

**VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**

**FAKULTA STROJNÍ**

**KATEDRA ROBOTIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky

Knihovna pohonů Dynamixel a jejich příslušenství pro CAD a  
simulační systémy

Library of Dynamixel Drive Unites and their Accessories for CAD and  
Simulation Systems

Student:

Ondřej Moša

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Václav Krys, Ph.D.

Ostrava 2020

## Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Moša**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2301R013 Robotika  
Téma: **Knihovna pohonů Dynamixel a jejich příslušenství pro CAD a simulační systémy**  
**Library of Dynamixel Drive Unites and their Accessories for CAD and Simulation Systems**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. K zadaným servopohonům Dynamixel dohledejte dostupné informace o jejich technických parametrech, dodávaném příslušenství a řídicích jednotkách.
2. Pro zadané pohonné jednotky vytvořte jejich 3D modely v CAD systémech Creo a Solidworks. Do provedení a parametrů 3D modelů bude zaneseno co nejvíce dohledaných technických parametrů jednotek dle pokynů vedoucího.
3. Pro zadané pohonné jednotky vytvořte jejich simulační modely v prostředí V-Rep. Do provedení a parametrů simulačních modelů bude zaneseno co nejvíce dohledaných technických parametrů jednotek dle pokynů vedoucího.
4. S využitím knihovny pohonných jednotek a jejich příslušenství proveďte návrh manipulátoru s alespoň 5 stupni volnosti.
5. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD a vytvořené 3D modely jednotek dle pokynů vedoucího.

### Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 2007. 48 s.

ČSN ISO 690 *Informace a dokumentace - Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Praha: Český normalizační institut, 2010.

SKAŘUPA, J.; MOSTÝN, V. *Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů*. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2002. 190 s. ISBN 80-88922-55-0.

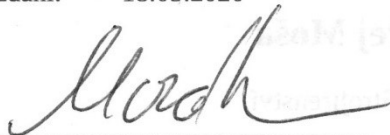
ROBOTIS STORE. Dostupné z: <http://www.robotis.us/>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Kryš, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



prof. Dr. Ing. Petr Novák  
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



## **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. 5. 2020

  
.....

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. 5. 2020



.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Ondřej Moša

Adresa trvalého pobytu autora práce: Gudrichova 124, Raduň, 747 61

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

MOŠA, Ondřej. *Knihovna pohonů Dynamixel a jejich příslušenství pro CAD a simulační systémy*. Ostrava, 2020. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robotiky. Vedoucí práce Ing. Václav Krys, Ph.D.

Tato bakalářská práce se zabývá tvorbou CAD a simulačních modelů pohonů Dynamixel a jejich příslušenství. V práci jsou analyzovány vlastnosti pohonů Dynamixel, dále je popsáno, jak vznikaly modely pohonů, a to konkrétně v CAD systémech Creo a SolidWorks a v simulačním systému V-Rep. Rovněž je zde popsáno možné využití knihovny pohonů na příkladu manipulátoru se šesti stupni volnosti.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

MOŠA, Ondřej. *Library of Dynamixel Drive Unites and their Accessories for CAD and Simulation Systems*. Ostrava, 2020. Bachelor Thesis. VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics. Thesis head Ing. Václav Krys, Ph.D.

This bachelor thesis deals with the creation of CAD and simulation models of Dynamixel drive units and their accessories. The thesis analyzes properties of Dynamixel drive units, it also describes, how the models of drive units were created, specifically in the Creo and SolidWorks CAD systems and in simulation system V-rep. It also describes the possible use of a library of drive units on the example of a manipulator with six degrees of freedom.

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval rodičům za podporu při studiu a vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Václavu Krysovi, Ph.D. za veškerou pomoc, cenné rady a připomínky.



# Obsah

<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>12</b>
<b>Seznam použitých značek a symbolů .....</b>	<b>13</b>
Jednotky .....	13
Proměnné .....	13
<b>Slovník termínů.....</b>	<b>14</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>15</b>
<b>1 Rešerše.....</b>	<b>16</b>
1.1 Softwary pro tvorbu modelů.....	16
1.1.1 PTC Creo .....	16
1.1.2 SolidWorks .....	16
1.1.3 V-Rep .....	17
1.2 Pohonné jednotky Dynamixel .....	17
1.2.1 DYNAMIXEL PRO.....	17
1.2.2 Připojovací prvky pro jednotky Dynamixel PRO .....	19
1.2.3 Dynamixel.....	19
1.2.4 Dynamixel X.....	21
<b>2 Tvorba 3D modelů v CAD systému Creo.....</b>	<b>23</b>
2.1 Tvorba pohonu H42P-020-S300-R.....	23
2.1.1 Součást H42P-020-S300-R_telo .....	23
2.1.2 Součást H42P-020-S300-R_přiruba.....	25
2.1.3 Sestava H42P-020-S300-R .....	26
2.1.4 Hmotnostní charakteristiky modelu .....	27
2.2 Tvorba připojovacího prvku FRP42-H121K.....	27
<b>3 Tvorba 3D modelů v CAD systému SolidWorks.....</b>	<b>31</b>
3.1 Tvorba pohonu H42P-020-S300-R.....	31
3.1.1 Součást H42P-020-S300-R_telo .....	31
3.1.2 Součást H42P-020-S300-R_přiruba.....	33
3.1.3 Sestava H42P-020-S300-R .....	34
3.1.4 Hmotnostní charakteristiky modelu .....	35
3.2 Tvorba připojovacího prvku FRP42-H121K.....	35

3.3	Zobrazení kót v 3D modelu .....	38
<b>4</b>	<b>Simulační modely v prostředí V-Rep .....</b>	<b>39</b>
4.1	Tvorba pohonu H42P-020-S300-R.....	39
4.2	Tvorba připojovacího prvku FRP42-H121K.....	46
<b>5</b>	<b>Návrh manipulátoru .....</b>	<b>49</b>
5.1	Tvorba manipulátoru v CAD systému Creo .....	49
5.2	Tvorba manipulátoru v simulačním prostředí V-Rep.....	52
<b>6</b>	<b>Náměty pro další rozšíření databáze modelů jednotek .....</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>58</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>59</b>
	<b>Přehled elektronických příloh práce.....</b>	<b>60</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1 DYNAMIXEL PRO [6].....	18
Obr. 2 DYNAMIXEL – řady MX, AX, RX [6] .....	20
Obr. 3 DYNAMIXEL X [6] .....	21
Obr. 4 H42-P-020-S300-R_telo – hlavní tvar.....	23
Obr. 5 H42-P-020-S300-R_telo – drážky a sražení.....	24
Obr. 6 H42-P-020-S300-R_telo – díry .....	24
Obr. 7 H42-P-020-S300-R_telo – kosmetické úpravy.....	25
Obr. 8 H42P-020-S300-R_priruba – vysunutí a díry.....	25
Obr. 9 H42P-020-S300-R_priruba – kosmetické úpravy .....	26
Obr. 10 H42P-020-S300-R – sestava.....	26
Obr. 11 FRP42-H121K_zakladna.....	28
Obr. 12 FRP42-H121K_bocnice_1.....	28
Obr. 13 FRP42-H121K_bocnice_2.....	29
Obr. 14 FRP42-H121K – sestava .....	29
Obr. 15 H42-P-020-S300-R_telo – hlavní tvar.....	31
Obr. 16 H42-P-020-S300-R_telo – drážky a sražení.....	32
Obr. 17 H42-P-020-S300-R_telo – díry .....	32
Obr. 18 H42-P-020-S300-R_telo – kosmetické úpravy.....	33
Obr. 19 H42P-020-S300-R_priruba – vysunutí a díry.....	33
Obr. 20 H42P-020-S300-R_priruba – kosmetické úpravy .....	34
Obr. 21 H42P-020-S300-R – sestava.....	34
Obr. 22 FRP42-H121K_zakladna.....	35
Obr. 23 FRP42-H121K_bocnice_1.....	36
Obr. 24 FRP42-H121K_bocnice_2.....	36
Obr. 25 FRP42-H121K – sestava .....	37
Obr. 26 FRP54-A110K – výřez výkresu [6].....	38
Obr. 27 FRP54-A110K – model, skica s kótami .....	38
Obr. 28 Creo – ukládání formátu Wavefront.....	39
Obr. 29 V-Rep – Import Options .....	40

---

Obr. 30 V-Rep – statická část modelu .....	40
Obr. 31 Creo – dynamická část modelu.....	41
Obr. 32 Nastavení vlastností motoru .....	42
Obr. 33 Creo – hmotnostní vlastnosti .....	43
Obr. 34 V-Rep – poloha těžiště a momenty setrvačnosti .....	44
Obr. 35 Umístění prvku "Force sensor" na přírubě a těle .....	44
Obr. 36 V-Rep – hierarchie modelu.....	45
Obr. 37 V-Rep – nastavení objektu H42P_020_S300_R_Telo .....	46
Obr. 38 V-Rep – statická část modelu FRP42-H121K.....	47
Obr. 39 V-Rep – dynamická část modelu FRP42-H121K.....	47
Obr. 40 V-Rep – umístění prvku "Force sensor" .....	48
Obr. 41 V-Rep – hierarchie modelu.....	48
Obr. 42 Manipulátor – KLOUB_1_2.....	50
Obr. 43 Manipulátor – KLOUB_3.....	50
Obr. 44 Manipulátor – KLOUB_4_5_6.....	51
Obr. 45 Manipulátor .....	52
Obr. 46 V-Rep – označení prvků .....	53
Obr. 47 V-Rep – prvky podřazeny.....	53
Obr. 48 V-Rep – pohon + připojovací prvek .....	54
Obr. 49 Postup tvorby manipulátoru 1.....	54
Obr. 50 Postup tvorby manipulátoru 2.....	55
Obr. 51 Postup tvorby manipulátoru 3.....	56
Obr. 52 Knihovna pohonů .....	60

## Seznam tabulek

Tab. 1 DYNAMIXEL PRO – přehled pohonů [6].....	18
Tab. 2 DYNAMIXEL PRO – přehled připojovacích prvků [6] .....	19
Tab. 3 DYNAMIXEL MX, AX a RX [6].....	20
Tab. 4 DYNAMIXEL XH [6].....	21
Tab. 5 DYNAMIXEL XM [6].....	22
Tab. 6 DYNAMIXEL XC [6].....	22
Tab. 7 DYNAMIXEL XL [6].....	22

## Seznam použitých značek a symbolů

### Jednotky

<b>A</b>	<b>ampér</b> , jednotka elektrického proudu
<b>g</b>	<b>gram</b> , jednotka hmotnosti, gram je tisícina kilogramu
<b>kg</b>	<b>kilogram</b> , jednotka hmotnosti
<b>kg · mm<sup>2</sup></b>	<b>kilogram krát milimetr na druhou</b> , jednotka momentu setrvačnosti
<b>kg · m<sup>-3</sup></b>	<b>kilogram na metr krychlový</b> , jednotka měrné hmotnosti
<b>LBS</b>	<b>libra</b> , jednotka hmotnosti, libra se přibližně rovná 0,454 násobku kilogramu
<b>mm</b>	<b>milimetr</b> , jednotka vzdálenosti, milimetr je tisícina metru
<b>m<sup>2</sup></b>	<b>čtvereční metr</b> , jednotka obsahu
<b>N·m</b>	<b>newton metr</b> , jednotka momentu síly
<b>ot/min</b>	<b>otáčky za minutu</b> , jednotka vyjadřující rychlost otáčení
<b>puls/ot</b>	<b>puls za otáčku</b> , jednotka určující přesnost (rozlišení) enkodéru
<b>V</b>	<b>volt</b> , jednotka elektrického napětí
<b>°</b>	<b>stupeň</b> , jednotka velikosti úhlu

### Proměnné

Značka	Význam	Jednotka
$I_{Crea}$	moment setrvačnosti převzatý z Crea	$kg \cdot mm^2$
$I_{V-rep}$	moment setrvačnosti (vydělen hmotností) zadávaný do V-Repu	$m^2$
$V_{telo}$	objem součásti tělo	$V$
$m_{celková}$	celková hmotnost servopohonu	$kg$
$m_{přiruby}$	hmotnost součásti příruba	$kg$
$m$	hmotnost součásti	$kg$
$\rho_{telo}$	hustota součásti tělo	$kg \cdot m^{-3}$

## Slovník termínů

**CAD** je počítačem podporované projektování

**Creo** je 3D CAD software

**DWG** je formát souborů programu AutoCAD

**Dynamixel** je servopohon od společnosti Robotis

**IGES** je soubor určený pro přenášení CAD dat mezi jednotlivými CAD systémy

**OPENMANIPULATOR-PRO** je manipulátor prodáváný společností Robotis

**PWM** je pulzně šířková modulace

**RGB LED** je červeno-zeleno-modrá elektroluminiscenční dioda

**RS-485** je rozhraní pro digitální přenos dat

**SolidWorks** je 3D CAD software

**STEP** je soubor určený pro přenášení CAD dat mezi jednotlivými CAD systémy

**TTL** je tranzistorově-tranzistorová logika

**V-Rep** simulační prostředí

**Wavefront (.OBJ)** je formát souboru určený pro 3D geometrii

## Úvod

Práce se zabývá vytvořením knihovny 3D modelů servopohonů Dynamixel v CAD systémech Creo, SolidWorks a v simulačním systému V-Rep.

Ze systémů používajících servopohony Dynamixel chci zmínit čtyřnohý kráčející robot Marvin, vyvinutý na Katedře robotiky. Vzniklá knihovna urychlí návrh podobných systémů, což se ve své práci pokusím prokázat na příkladu sestavy manipulátoru se šesti stupni volnosti.

V první části práce jsou shrnuty obecné informace o použitých CAD a simulačních systémech a informace týkající se servopohonů Dynamixel.

Další části práce popisují tvorbu modelů pohonů a připojovacích prvků v jednotlivých CAD systémech.

Jako příklad využití vzniklé knihovny uvádím manipulátor se šesti stupni volnosti.

Podklady pro tvorbu modelů jsou dostupné na stránkách výrobce pohonů. Jedná se o e-manuál, částečnou výkresovou dokumentaci a soubory ve formátu STEP, který slouží pro přenášení CAD dat mezi jednotlivými softwary a má jen omezené možnosti editace.



## 1 Rešerše

Shrnutí základních informací o použitých softwarových nástrojích a pohonech Dynamixel.

### 1.1 Softwaru pro tvorbu modelů

Knihovna pohonů Dynamixel byla vytvořena v systémech Creo, SolidWorks a V-Rep. Tyto softwary a jejich specifikace jsou shrnuty v následujících podkapitolách.

#### 1.1.1 PTC Creo

Společnost PTC poskytuje celou řadu CAD aplikací pro návrh a výrobu produktů. [1] Co se historie týče, vývoj Crea začal již v roce 1988, kdy ještě pod názvem Pro/ENGINEER byla spuštěna první verze softwaru. V tom samém roce společnost PTC získala svého prvního zákazníka, a to výrobce těžké techniky John Deere. V roce 2010 firma představila první verzi softwaru PCT Creo, která umožňovala kromě parametrického modelování také modelování volné. [2]

PTC Creo pracuje na operačním systému Microsoft Windows a můžeme ho zařadit mezi zástupce takzvaných velkých CAD systémů.

Creo rovněž nabízí nástroje podporující sestavy svařenců, odlévání, simulaci FEM, průtokovou analýzu, topologickou optimalizaci, nástroje pro realistické vykreslení modelu a mnoho dalších.

#### 1.1.2 SolidWorks

SolidWorks je parametrický 3D CAD systém používaný převážně ve strojírenství.

Společnost SOLIDWORKS Corporation byla založena Jonem Hirschtickem v roce 1993. Peníze na založení společnosti vyhrál Hirschtick hraním Blackjacku. Dva roky poté byla na trh uvedena první verze systému s názvem SolidWorks 95. V roce 1997 byla společnost SolidWorks odkoupena společností Dassault Systemes. Do současnosti bylo na trh uvedeno 26 verzí. Poslední v říjnu roku 2019 a to SolidWorks 2020. [3]

Solidworks od úplného začátku svého vývoje pracuje na operačním systému Microsoft Windows a je dostupný i v českém jazyce.

Solidworks je na světovém i českém trhu velice úspěšný. Velkou výhodou softwaru je intuitivní prostředí a dostupnost online tutoriálu, což začínajícím i pokročilým uživatelům značně zjednodušuje práci.

SolidWorks taktéž nabízí řadu doplňkových nástrojů jako FEM analýzy, pohybové simulace, podporu plechových dílů a svařovaných konstrukcí, knihovnu normalizovaných součástí, simulaci proudění a další. [4]

### 1.1.3 V-Rep

V-Rep je simulační prostředí určené pro roboty. [5]

První verze byla představena veřejnosti v březnu roku 2010 a v listopadu roku 2019 došlo k přejmenování z V-Rep na CoppeliaSim.

V-Rep může např. sloužit k simulaci automatických systémů, dálkovému sledování, kontrole hardwaru, návrhu prototypů a řídicích algoritmů, prezentaci produktů a vzdělávání v oblasti robotiky. Části jednotlivých systémů, jako např. základní geometrické tvary, motory, sensory apod. navazují vždy jedna na druhou. Jednotlivé systémy pak mohou být řízeny skriptem v programovacích jazycích C/C++, Python, Java, Lua, Matlab, Octave a Urbi.

## 1.2 Pohonné jednotky Dynamixel

Dynamixel je označení servopohonů pro roboty korejské společnosti Robotis [6]. Společnost v současné době nabízí 47 různých servopohonů rozdělených ve třech hlavních výkonových řadách, a to Dynamixel, Dynamixel PRO a Dynamixel-X.

### 1.2.1 DYNAMIXEL PRO

Pod označením DYNAMIXEL PRO spadá šest servopohonů, z nichž jsou tři označeny písmenem H značící vysoký výkon a zbývající tři jsou označeny písmeny M značící střední výkon. Pohony řady H oproti pohonům řady M poskytují větší kroutící momenty a umožňují větší přesnost polohování. V servopohonech Dynamixel PRO jsou použity elektromotory od společnosti Maxon spolu s cykloidní převodovkou.

Pohon může pracovat v pěti různých operačních modech, a to řízení momentu, řízení rychlosti, řízení polohy (natočení), rozšířený režim řízení polohy a PWM. Řízení pohonu probíhá přes sériovou průmyslovou sběrnici RS-485. Jmenovité napětí jednotek je 24 V.

Výrobce poskytuje několik řídicích jednotek pro pohony Dynamixel PRO a to: OpenCR1.0, OpenCM9.04-C v kombinaci s OpenCM 485 expansion board a U2D2 umožňující přímé řízení pohonů počítačem. Pohony je možné zapojit do série, což ušetří množství použité kabeláže i počet výstupů na řídicí jednotce.

Na Obr. 1 můžeme vidět ukázkou pohonů Dynamixel PRO, a to konkrétně H54P-200-S500-R nalevo a H54P-100-S500-R napravo.



Obr. 1 DYNAMIXEL PRO [6]

V tabulce Tab. 1 je uvedeno srovnání základních parametrů servopohonu.

Tab. 1 DYNAMIXEL PRO – přehled pohonů [6]

Pohon	Nepřetržitý chod			Hmotnost [g]	Rozměry [mm]	Rozlišení [pulsů/ot]
	Rychlost [ot/min]	Moment [N·m]	Proud [A]			
H54P-200-S500-R	29,0	44,7	9,3	855	54 x 126 x 54	1,003,846
H54P-100-S500-R	29,2	25,3	5,5	740	54 x 108 x 54	1,003,846
H42P-020-S300-R	29,2	5,1	1,5	340	42 x 84 x 42	607,500
M54P-060-S250-R	28,3	10,1	3,0	855	54 x 126 x 54	502,834
M54P-040-S250-R	24,2	3,9	1,9	710	54 x 108 x 54	502,834
M42P-010-S260-R	26,0	1,7	0,6	270	42 x 72 x 42	526,374

### 1.2.2 Připojovací prvky pro jednotky Dynamixel PRO

K jednotlivým pohonům série Dynamixel PRO je možné dokoupit osm dílů sloužících k uchycení pohonů. Spojovací díly jsou vyrobeny ze slitiny hliníku a k servopohonům se spojují šrouby M3. V tabulce Tab. 2 je uveden přehled jednotlivých pohonů Dynamixel PRO a k nim příslušejících spojovacích prvků.

Tab. 2 DYNAMIXEL PRO – přehled připojovacích prvků [6]

	H42P-020-S300-R	H54P-100-S500-R	H54P-200-S500-R	M42P-010-S260-R	M54P-040-S250-R	M54P-060-S250-R
FRP42-A110K Set	✓			✓		
FRP42-H221K Set				✓		
FRP42-I110K Set	✓			✓		
FRP42-H121K Set	✓					
FRP54-A110K Set		✓	✓		✓	✓
FRP54-I110K Set		✓	✓		✓	✓
FRP54-H121K Set		✓			✓	
FRP54-H221K Set			✓			✓

### 1.2.3 Dynamixel

Pohony s označením Dynamixel se dělí na tři řady, a to: MX, AX a RX (Obr. 2). V čem se odlišují jednotlivé řady je popsáno níže a základní parametry jsou shrnuty v Tab. 3.

Nejnovější ze série Dynamixel je řada pohonů MX. Ve všech pohonech řady MX je bezkontaktní absolutní enkodér, díky kterému je možné řídit natočení s přesností až  $0,088^\circ$  a to v rozsahu  $360^\circ$ . Při režimu řízení rychlosti není omezen úhel natočení. Až na jednu výjimku (MX-12W) jsou v motorech použity kovové převody. Připojovací prvky prodávané k této řadě pohonů jsou z hliníku.

Pohony řady AX umožňují řídit natočení s přesností  $0,29^\circ$  a to v rozsahu  $300^\circ$ . Při režimu řízení rychlosti není omezen úhel natočení. K určování pozice je v pohonech využíván potenciometr. V pohonech řady AX jsou využity plastové převody, popřípadě kombinace plastových a kovových převodů. Z plastu jsou rovněž vyrobeny i připojovací prvky dodávané k této řadě pohonů.

Pohony řady RX se již nevyrábějí, pouze pohon RX-64 se ještě doprodává. Stejně jako pohony řady AX používají pohony řady RX k určení pozice potenciometr. Pohony umožňují řídit natočení s přesností  $0,29^\circ$  a to v rozsahu  $300^\circ$ . Při řízení rychlosti (otáček) není omezen úhel otáčení. V pohonech jsou použity kovové převody a potenciometr pro snímání polohy. Připojovací prvky dodávané k této řadě jsou z hliníku.



Obr. 2 DYNAMIXEL – řady MX, AX, RX [6]

Tab. 3 DYNAMIXEL MX, AX a RX [6]

Pohon	Hmotnost [g]	Rozměry [mm]	Sběrnice	Napětí [V]	Moment [N·m]	Proud [A]	Otáčky [ot/min]
MX-106	165	40,2x65,1x46	RS485 / TTL	10–4,8	10	6,3	55
MX-64	165	40,2x61,1x41	RS485 / TTL	10–4,8	7,3	5,2	78
MX-28	77/72	35,6x50,6x35,5	RS485 / TTL	10–4,8	3,1	1,7	67
MX-12W	54,6	32x50x40	TTL	10–4,8	–	–	470
AX-18	54,5/55,9	32x50x40	TTL	9–12	1,8	2,2	97
AX-12(+/A)	53,5/54,6	32x50x40	TTL	9–12	1,5	1,5	59
AX-12W	52,9	32x50x40	TTL	9–12	–	–	470
RX-64	125	40,2x61,1x41	RS485	12–18,5	5,3	2,6	64

### 1.2.4 Dynamixel X

Pohony této řady se dělí na další čtyři kategorie a to: XH (vysoký výkon), XM (střední výkon), XC (komerční) a XL (nízké náklady). V pohonech je zabudovaný mikrokontroler ARM CORTEX-M3. Přesnost natočení pohonů je až 4096 kroků na otáčku. Pohony umožňují pracovat v následujících modech: ovládání rychlosti, ovládání pozice (natočení), rozšířený režim ovládání pozice a PWM. Pohony mohou dodávat řadu zpětných informací o aktuálním natočení, rychlosti otáčení, zatížení, teplotě, vstupním napětí atd. Jestliže je poslední písmeno v názvu pohonu „R“, je pohon řízen přes sběrnici RS-485. Jestliže je poslední písmeno v názvu pohonu „T“, tak je pohon řízen přes TTL sběrnici (Obr. 3).



Obr. 3 DYNAMIXEL X [6]

Pohony řady Dynamixel XH umožňují kromě standardních operačních režimů také řízení výstupního momentu a kombinaci řízení polohy a momentu. Pohony této série, jejichž název začíná číslem 540, mají hmotnost 165 g a rozměry 33,5 x 58,5 x 44 mm. Pohony, jejichž název začíná číslem 430, mají hmotnost 82 g a rozměry 28,5 x 46,5 x 34 mm. Ostatní vlastnosti jsou shrnuty v Tab. 4.

Tab. 4 DYNAMIXEL XH [6]

Pohon	Vstupní napětí [V]	Moment [N·m]	Proud [A]	Otáčky [ot/min]
XH540-V270-R	24	9,2	2,4	34
XH540-W270-T/R	10–14,8	11,7	5,9	46
XH540-V150-R	24	6,4	2,4	60
XH540-W150-T/R	10–14,8	8,5	5,9	86
XH430-V350-R	24	3,3	0,7	31
XH430-W350-T/R	10–14,8	4,2	1,5	37
XH430-V210-R	24	2,6	0,7	52
XH430-W210-T/R	10–14,8	3,1	1,5	62

Pohony řady Dynamixel XM umožňují kromě standardních operačních režimů také řízení výstupního momentu a kombinaci řízení polohy a momentu. Hmotnosti a rozměry pohonů se shodují s řadou XH. Další vlastnosti pohonů této řady jsou shrnuty v Tab. 5.

Tab. 5 DYNAMIXEL XM [6]

Pohon	Vstupní napětí [V]	Moment [N·m]	Proud [A]	Otáčky [ot/min]
XM540-W270-T/R	10–14,8	12,9	5,5	37
XM540-W150-T/R	10–14,8	8,9	5,5	66
XM430-W350-T/R	10–14,8	4,8	2,7	57
XM430-W210-T/R	10–14,8	3,7	2,7	77

Další sérií pohonů je Dynamixel XC. Rozměry pohonů této série jsou 28,5 x 46,5 x 34 mm. Hmotnost pohonů je 65 g. Vlastnosti pohonů této řady jsou shrnuty v Tab. 6.

Tab. 6 DYNAMIXEL XC [6]

Pohon	Vstupní napětí [V]	Moment [N·m]	Proud [A]	Otáčky [ot/min]
XC430-W240-T	6,5–14,8	1,9	1,4	70
XC430-W150-T	6,5–14,8	1,6	1,4	106

Pohony řady XL jsou dosti odlišné od předchozích sérií. Pohon 2XL430-W250-T se od ostatních pohonů liší tím, že má dvě výstupní osy. Rozměry tohoto pohonu jsou 36 x 46,5 x 36 mm a hmotnost 98,2 g. Další pohon z této série je XL430-W250-T s rozměry 28,5 x 46,5 x 34 mm a hmotností 57,2 g. Poslední pohon série XL320 má rozměry 24 x 36 x 27 mm a hmotnost 16,7 g. Další vlastnosti pohonů této řady jsou shrnuty v Tab. 7.

Tab. 7 DYNAMIXEL XL [6]

Pohon	Vstupní napětí [V]	Moment [N·m]	Proud [A]	Otáčky [ot/min]
2XL430-W250-T	6,5–12	1,5	1,4	61
XL430-W250-T	6,5–12	1,5	1,4	61
XL-320	6–8,4	0,39	1,1	114

## 2 Tvorba 3D modelů v CAD systému Creo

V systému Creo bylo vytvořeno šest modelů servopohonů Dynamixel a dalších devět k nim příslušících spojovacích prvků. Jednotlivé modely servopohonů se liší velikostí, případně počty připojovacích závitových děr. Tvarově si jsou podobné. Z tohoto důvodu bude dále podrobně popsána pouze tvorba modelu H42P-020-S300-R, u ostatních pohonů se postupovalo stejně. Taktéž u spojovacích prvků bude podrobněji rozebrán pouze postup modelování FRP42-H121K.

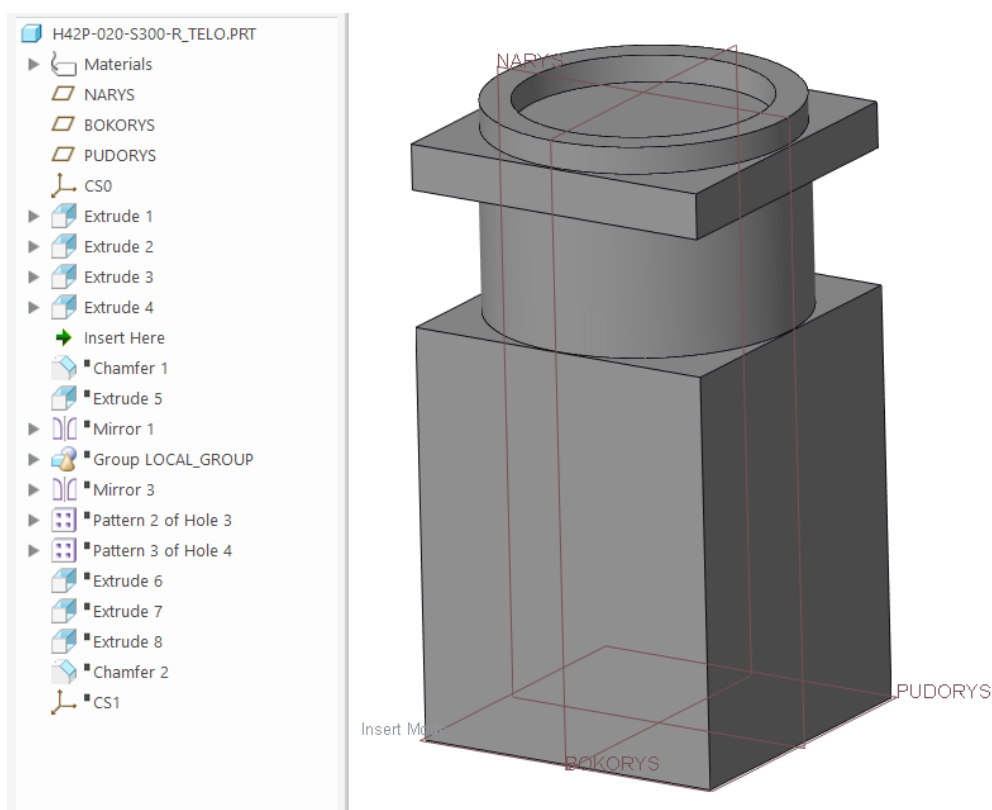
### 2.1 Tvorba pohonu H42P-020-S300-R

Jako zdroj informací o pohonech Dynamixel byly použity webové stránky firmy Robotis. Na stránkách kromě technického popisu bylo možno stáhnout i výkresovou dokumentaci a 3D modely ve formátu STEP a IGES.

K samotnému vytváření modelů v systému Creo nejlépe posloužily stažené 3D modely. U některých složitějších tvarů byla k užítku i výkresová dokumentace v DWG.

#### 2.1.1 Součást H42P-020-S300-R\_telo

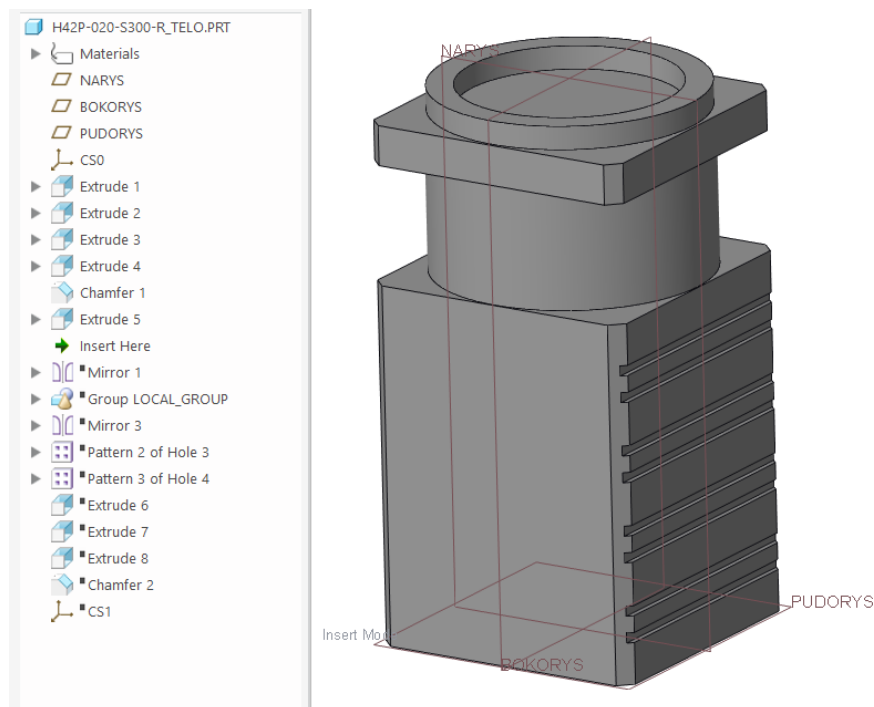
Nejprve byl vytvořen, čtyřmi prvky „extrude“, hlavní tvar těla modelu (Obr. 4).



Obr. 4 H42-P-020-S300-R\_telo – hlavní tvar

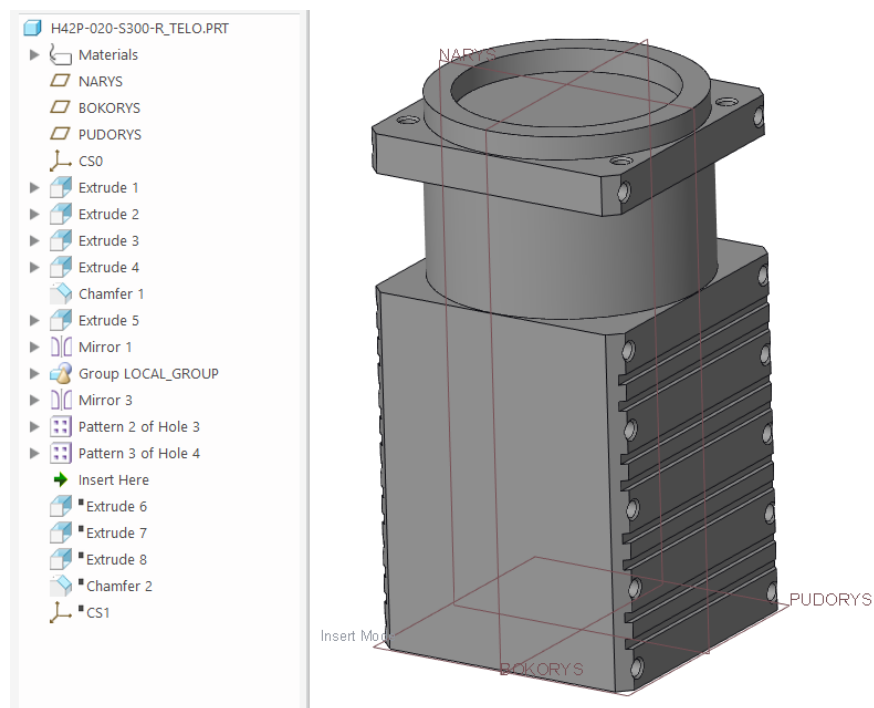


Dále bylo nástrojem „chamfer“ provedeno sražení svislých hran. Nástrojem „extrude“ a „mirror“ byly vytvořeny drážky na bocích těla (Obr. 5).



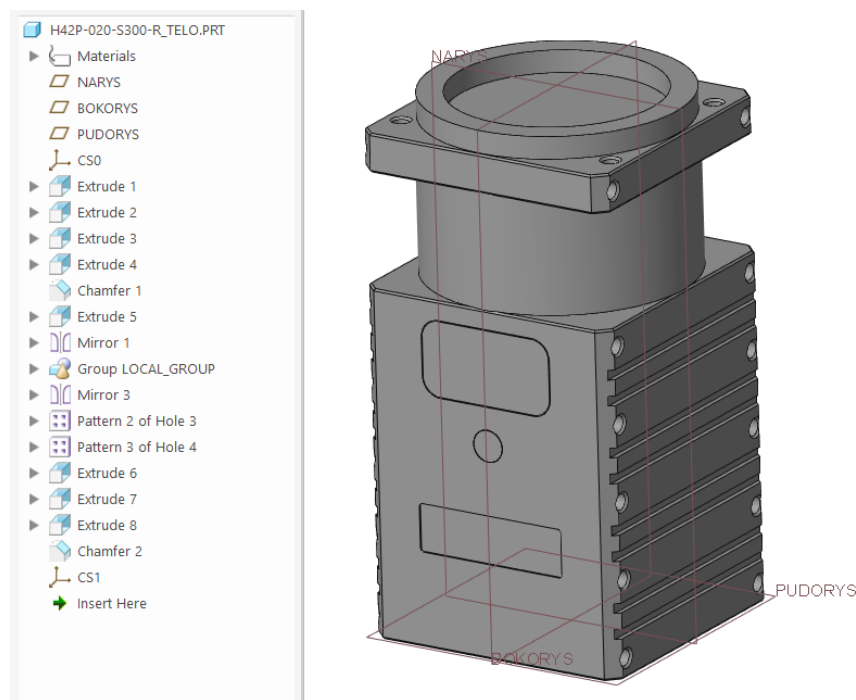
Obr. 5 H42-P-020-S300-R\_telo – drážky a sražení

V následujícím kroku byly vytvořeny všechny závitové díry M3x6. K tomu byly použity nástroje „hole“, „pattern“ a „group“ (Obr. 6).



Obr. 6 H42-P-020-S300-R\_telo – díry

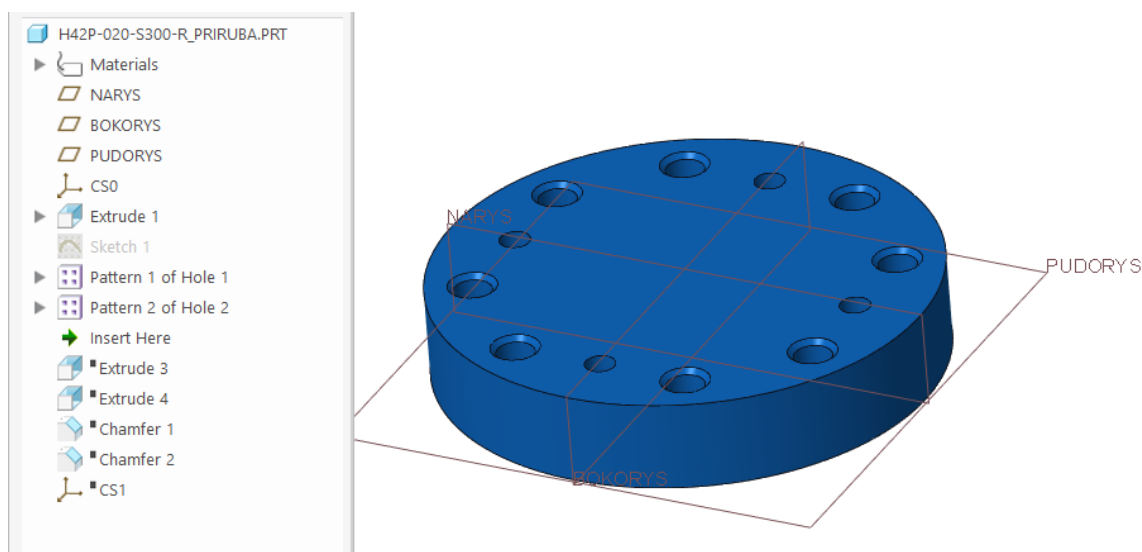
Na závěr byly provedeny kosmetické úpravy. A to třikrát prvek „extrude“, které znázorňují umístění krytu externího portu, RGB LED a štítek s názvem pohonu. Poté byly nástrojem „chamfer“ sraženy hrany (Obr. 7).



Obr. 7 H42-P-020-S300-R\_telo – kosmetické úpravy

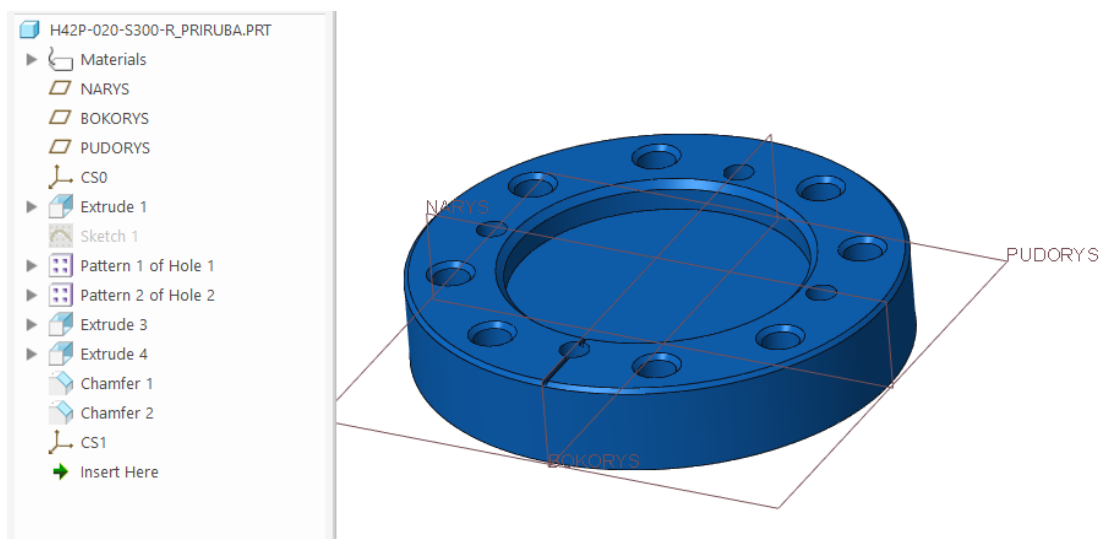
### 2.1.2 Součást H42P-020-S300-R\_priruba

Nejprve byl nástrojem „extrude“ vytvořen válec. Dále byly pomocí nástrojů „hole“ a „pattern“ přidány díry (Obr. 8).



Obr. 8 H42P-020-S300-R\_priruba – vysunutí a díry

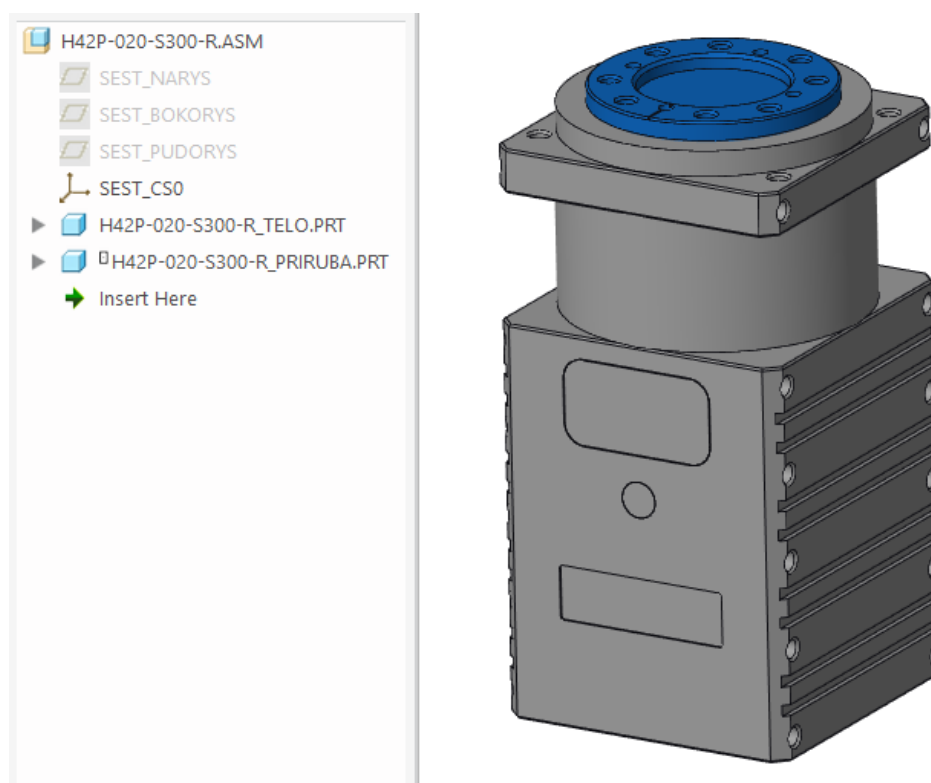
Příruba byla dokončena použitím nástroje „extrude“ a „chamfer“ (Obr. 9).



Obr. 9 H42P-020-S300-R\_piruba – kosmetické úpravy

### 2.1.3 Sestava H42P-020-S300-R

Byla založena sestava. Do sestavy byla vložena součást H42-P-020-S300-R\_telo a poloha součásti v prostoru byla nastavena na „default“. Následně byla vložena i součást H42P-020-S300-R\_piruba a spojena vazbou „pin“ k součásti tělo (Obr. 10).



Obr. 10 H42P-020-S300-R – sestava

### 2.1.4 Hmotnostní charakteristiky modelu

Výrobce udává pouze celkovou hmotnost servopohonu. Polohu těžiště ani momenty setrvačnosti výrobce neuvádí. Z tohoto důvodu byl zvolen následující postup. Modelu příruby byl přiřazen materiál hliník, z jehož vlastností je nejpodstatnější hustota ( $2710 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Následně byla použitím nástroje „Mass Properties“ zjištěna hmotnost příruby. V následujícím kroku byl použitím nástroje „Mass Properties“ zjištěn objem součásti tělo. Hustota  $\rho_{telo}$  je potom:

$$\rho_{telo} = \frac{m_{celková} - m_{přiruby}}{V_{telo}} = \frac{0,34 - 0,011417124}{1,2960798 \cdot 10^{-4}} = 2535,206 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.1)$$

kde  $m_{celková}$  je celková hmotnost servopohonu,

$m_{přiruby}$  je hmotnost součásti příruba,

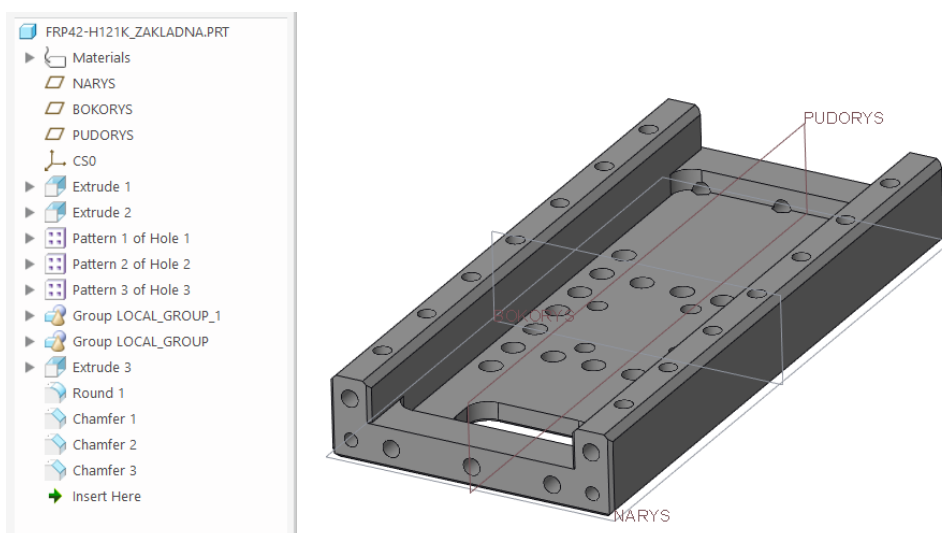
$V_{telo}$  je objem součásti tělo.

Konkrétní hodnoty dosazené do vzorce jsou uvedeny jako příklad výpočtu hustoty těla pohonu H42P-020-S300-R. U ostatních pohonů se postupovalo analogicky.

## 2.2 Tvorba přípojovacího prvku FRP42-H121K

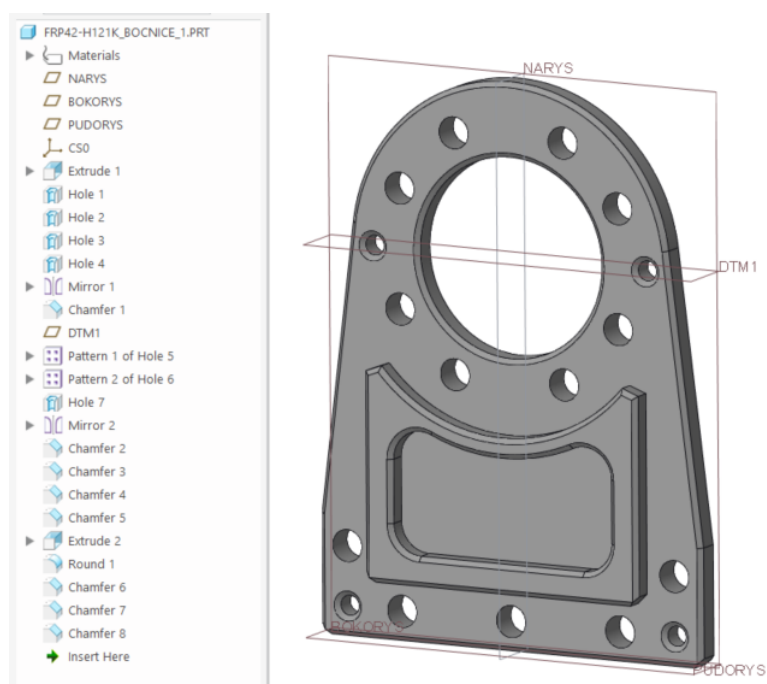
Modely přípojovacích prvků byly vytvořeny obdobným postupem jako modely pohonů, a to převážně měřením staženého 3D modelu a následným modelováním.

Spojovací prvek se skládá ze tří hlavních částí a šroubů. Pomocí prvků „extrude“ byl vytvořen hlavní tvar modelu FRP42-H121K\_zakladna. Následně za použití nástroje „hole“ a „pattern“ byly vytvořeny díry. Díry, u kterých nebylo možno použít nástroj pole, byly pro větší přehlednost spojeny nástrojem „group“ do jedné skupiny (Obr. 11).



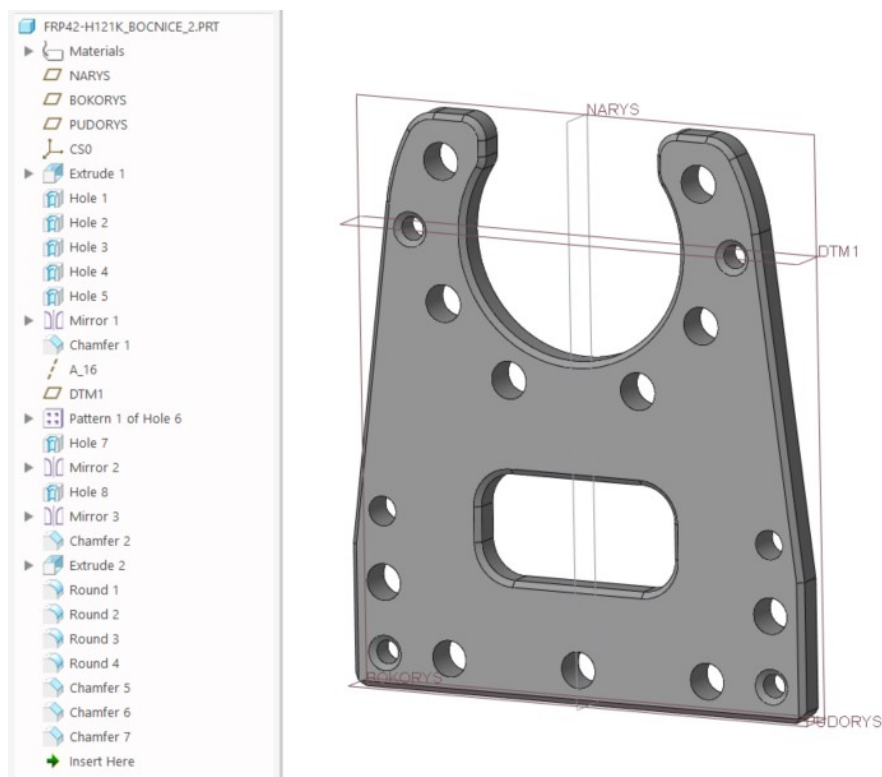
Obr. 11 FRP42-H121K\_zakladna

Základní obrys modelu FRP42-H121K\_bocnice\_1 byl vytvořen opět vysunutím. Poté byly vytvořeny díry v levé dolní části dílu a zrcadleny nástrojem „Mirror“. Následně byly příslušným dírám sraženy hrany a přidána rovina DTM1, která usnadňuje zakótování děr v horní polovině součásti. Ač to tak může vypadat, díry v horní polovině součásti nejsou na jednom roztečném průměru, ale jsou kótovány vzdálenosti mezi příslušnými protějšími dírami. Z tohoto důvodu bylo potřeba použít dvakrát příkaz „pattern“. Dále byla vytvořena díra „Hole 7“ a protější díra vznikla zrcadlením. Následují čtyři sražení hran, vysunutí, zaoblení a další tři sražení (Obr. 12).



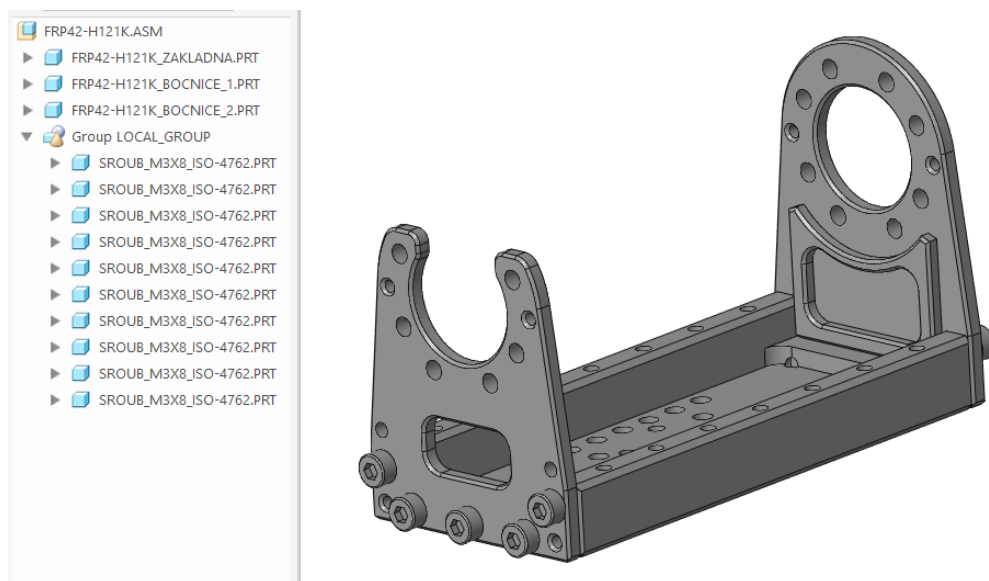
Obr. 12 FRP42-H121K\_bocnice\_1

Součást FRP42-H121K\_BOCNICE\_2 a součást FRP42-H121K\_BOCNICE\_1 mají shodné rozmístění děr. Součásti se liší převážně ve skice prvního vysunutí a počtem děr (Obr. 13).



Obr. 13 FRP42-H121K\_bocnice\_2

Byla vytvořena sestava přípojovacího prvku a vytvořené součásti byly příkazem „coincident“ přiřazeny k sobě. Poté byly do sestavy obdobně přidány šrouby (Obr. 14).



Obr. 14 FRP42-H121K – sestava

Došel jsem k závěru, že hmotnosti připojovacích prvků uvedené na stránkách výrobce, nejsou pro všechny prvky úplně reálné. Např. pro připojovací prvek FRP54-A110K uvádí výrobce hmotnost 1 LBS po přepočtu 0,454 kg. Při této hmotnosti by připojovací prvek měl hustotu  $41\,448 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Pro ostatní připojovací prvky se hustota při dodržení hmotnosti výrobce pohybovala od  $3\,418 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  až po  $81\,460 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Pro sjednocení výsledků byl zvolen následující postup přiřazování hmotnostních vlastností. Všem částem připojovacích prvků byly přiřazeny vlastnosti hliníku, jehož hustota je  $2\,710 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Výjimkou jsou šrouby, těm byly přiřazeny vlastnosti oceli, jejíž hustota je  $7\,827 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

### 3 Tvorba 3D modelů v CAD systému SolidWorks

Všech patnáct modelů vytvořených v systému Creo bylo rovněž vytvořeno v systému SolidWorks. Modely vytvořené v systému Creo práci značně zjednodušily. Bylo možné použít stejné základní prvky modelu jako vysunutí, díry apod. Rovněž již nebylo třeba rozměry dohledávat ve výkresové dokumentaci nebo odměřovat na STEP modelu. V systému Creo se nástroji „Edit Dimension“ nebo „Edit Definition“ daly rozměry jednotlivých prvků snadno zobrazit.

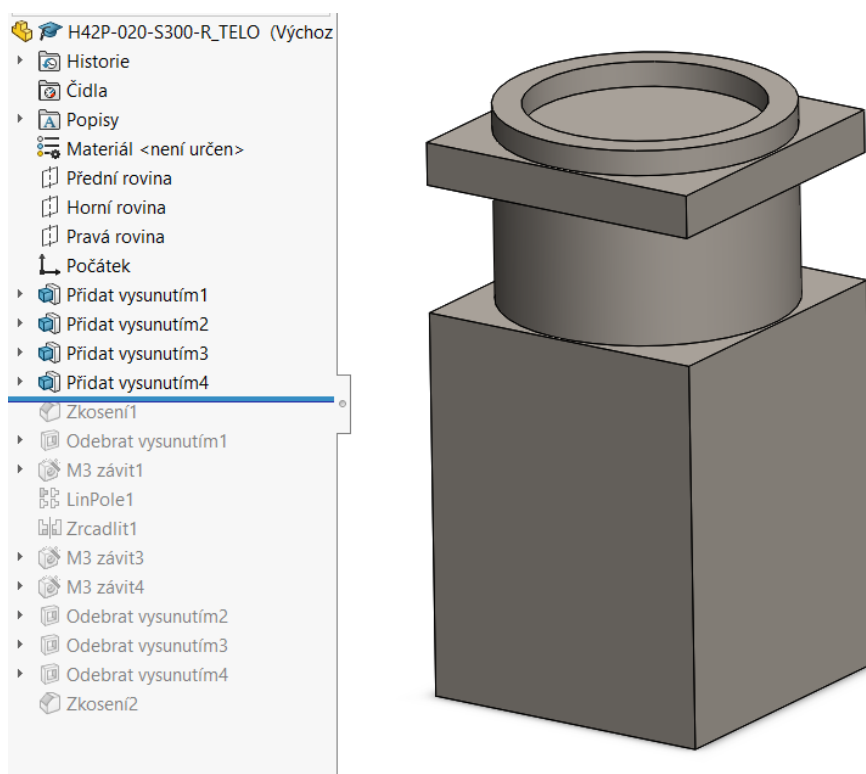
Autoři příručky Úvod do SolidWorks radí, aby byly skici použité pro vytváření prvků plně určeny. [7] Toto bylo u všech modelů dodrženo.

#### 3.1 Tvorba pohonu H42P-020-S300-R

Model je rozdělen na součásti H42P-020-S300-R\_telo a H42P-020-S300-R\_priruba. Dále je popsána tvorba obou součástí a jejich spojení v sestavě.

##### 3.1.1 Součást H42P-020-S300-R\_telo

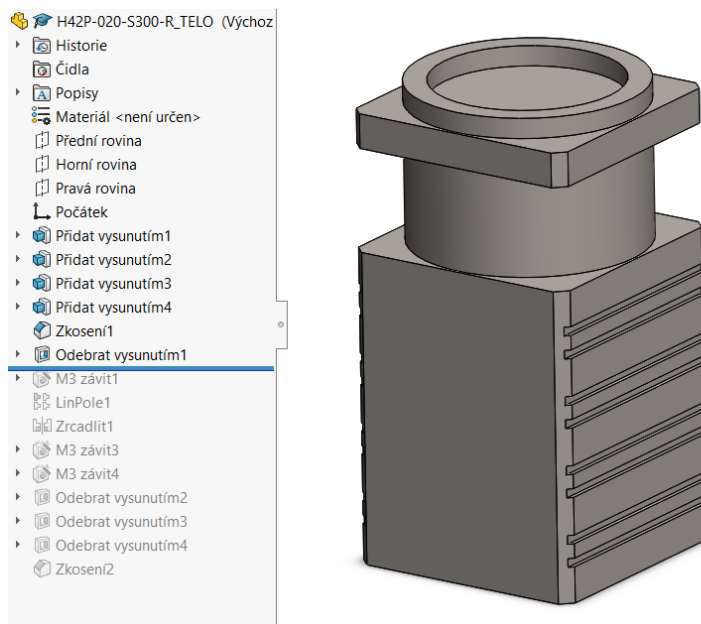
Nejprve byl nástroji „Načrtnout skicu“ a „Přidat vysunutím“ vytvořen základní tvar modelu (Obr. 15).



Obr. 15 H42-P-020-S300-R\_telo – hlavní tvar

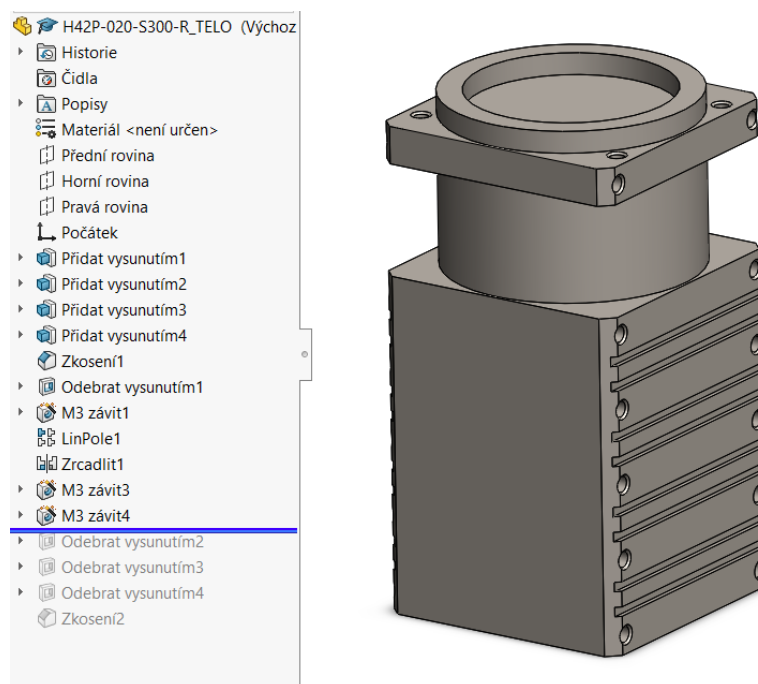


V dalším kroku byly sraženy svíslé hrany a to nástrojem „Zkosení“. Dále byly nástroji „Načrtnout skicu“ a „Odebrat vysunutím“ vytvořeny drážky na bocích modelu (Obr. 16).



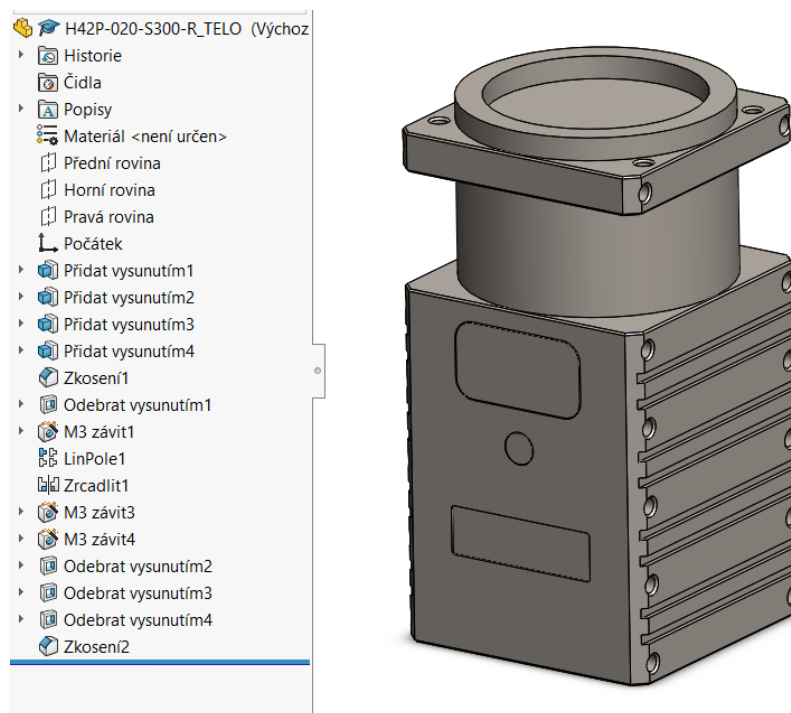
Obr. 16 H42-P-020-S300-R\_telo – drážky a sražení

Poté byly nástrojem „Průvodce dírami“ vytvořeny závitové díry M3x8. U menšího počtu děr byly jednotlivé díry určeny skicou. V případě s více než čtyřmi dírami na jedné ploše byl použit nástroj „Lineární pole“ a následně nástroj „Zrcadlit“. U lineárního pole bylo využito možnosti vynechání prvků tam, kde nebyly potřeba (Obr. 17).



Obr. 17 H42-P-020-S300-R\_telo – díry

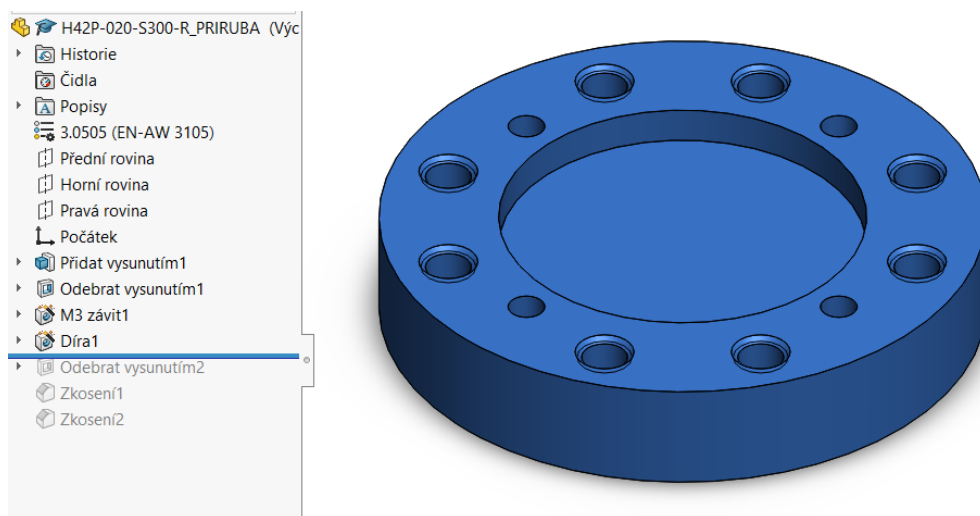
Na závěr byl třikrát použit nástroj „Odebrat vysunutím“, naznačující kryt externího portu, RGB LED a štítek s názvem pohonu. Nástrojem „Zkosení“ byly sraženy hrany (Obr. 18).



Obr. 18 H42-P-020-S300-R\_telo – kosmetické úpravy

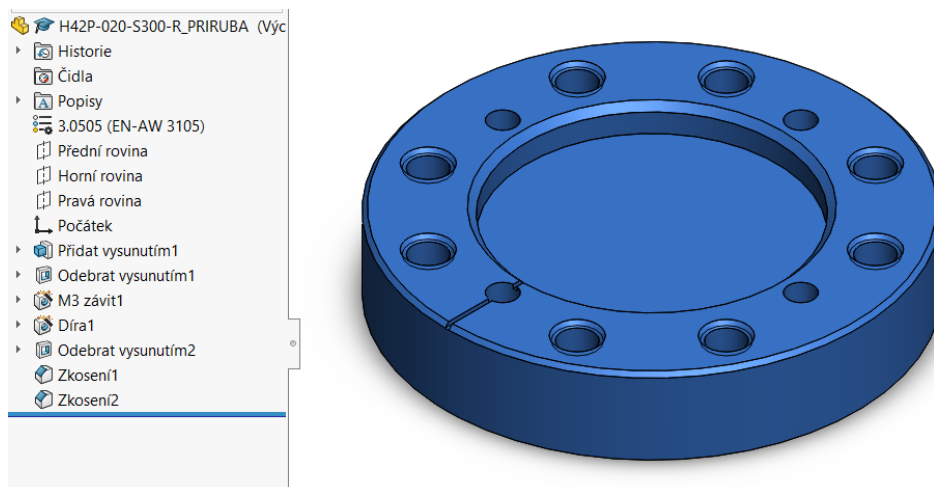
### 3.1.2 Součást H42P-020-S300-R\_priruba

Nástroji „Skica“, „Přidat vysunutím“ a „Odebrat vysunutím“ byl vytvořen základní tvar. Dále byly nástrojem „Průvodce dírami“ vytvořeny díry na přírubě, a to konkrétně osm děr se závitem M3 a čtyři díry o průměru 2 mm (Obr. 19).



Obr. 19 H42P-020-S300-R\_priruba – vysunutí a díry

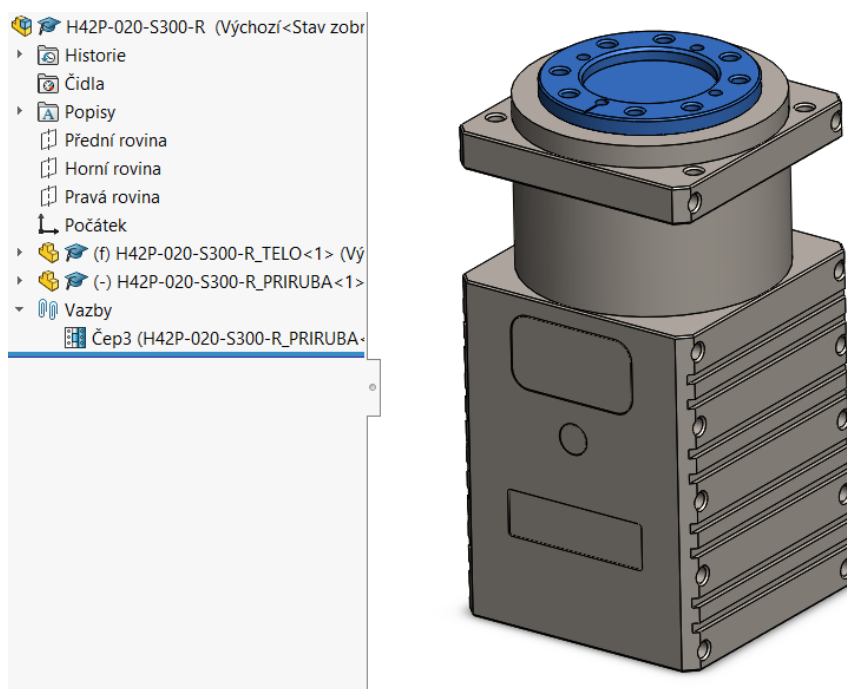
Nakonec byly zkoseny hrany a vytvořena jedna drážka nástroji „Skica“, „Odebrat vysunutím“ a „Zkosení“ (Obr. 20).



Obr. 20 H42P-020-S300-R\_priruba – kosmetické úpravy

### 3.1.3 Sestava H42P-020-S300-R

Byla založena sestava, do které byla vložena součást H42P-020\_S300-R\_telo. U vkládání této součásti bylo potřeba dodržet to, aby se s ní bezprostředně po vložení neotáčelo, ale ihned se vložení potvrdilo, čímž byla součást vložena jako pevná a roviny součásti jsou shodné s rovinami sestavy. Dále byla do sestavy vložena součást příruba a následně byla přidána vazba „Čep“ spojující obě součásti (Obr. 21).



Obr. 21 H42P-020-S300-R – sestava

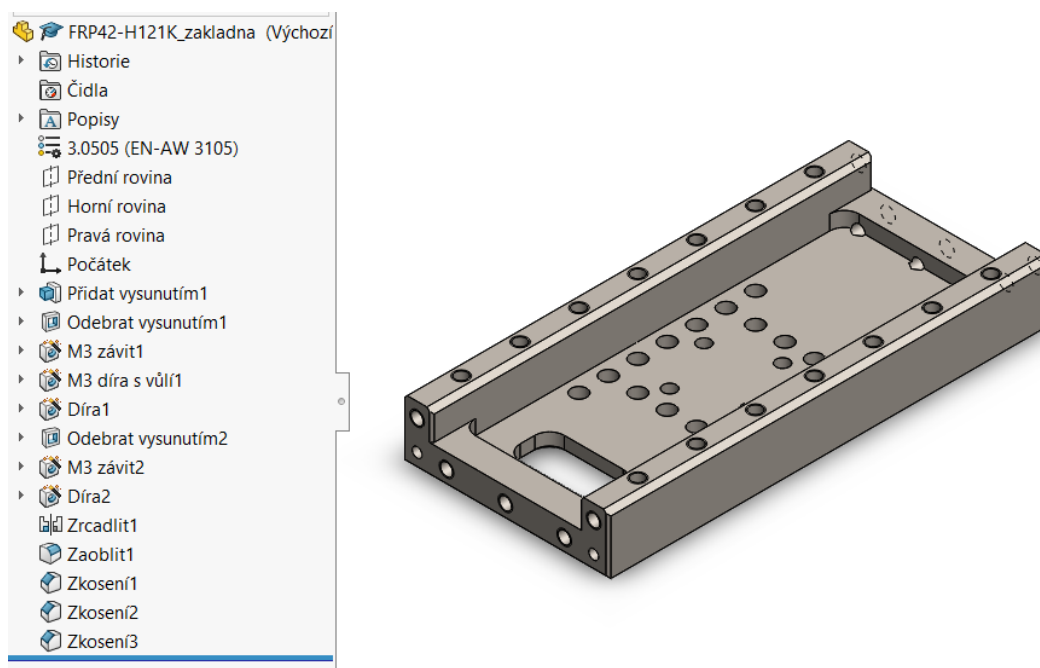
### 3.1.4 Hmotnostní charakteristiky modelu

Zde byl zvolen trochu jiný postup než u modelů vytvořených v systému Creo. Modelu příruby byl přiřazen materiál hliník s hustotou  $2\,710\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , což je hodnota shodná s hustotou přiřazenou modelu příruby v Creu. Dále byla nástrojem „Fyzikální vlastnosti“ zjištěna hmotnost příruby. Následně byla hmotnost příruby odečtena od celkové hmotnosti pohonu, kterou udává výrobce. Takto vypočítaná hmotnost byla poté přes nástroj „Fyzikální vlastnosti / Přepsat vlastnosti hmoty...“ přiřazena součásti tělo. SolidWorks po potvrzení automaticky dopočetl zbývající hmotnostní charakteristiky součásti tělo. Tímto postupem by mělo být zajištěno, aby hmotnostní charakteristiky modelů v softwaru SolidWorks odpovídaly charakteristikám modelů vytvořených v Creu.

## 3.2 Tvorba připojovacího prvku FRP42-H121K

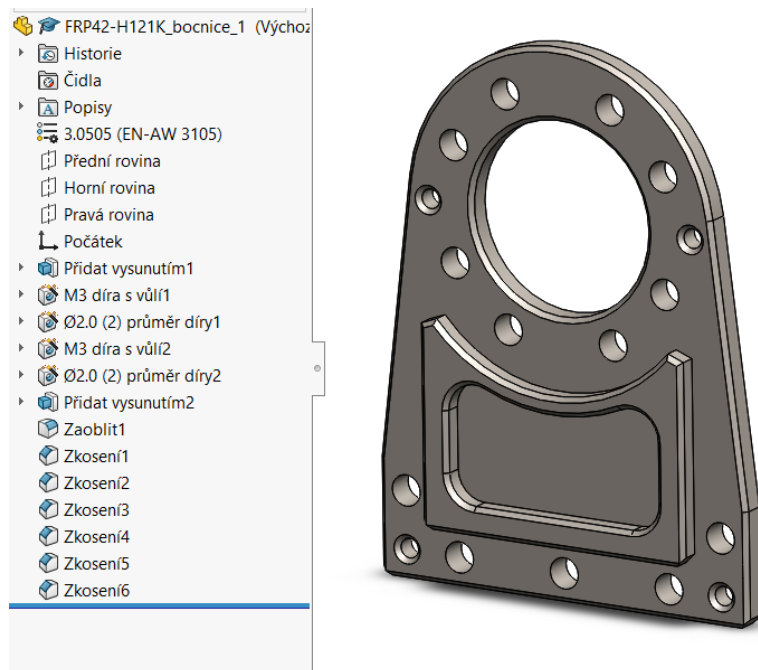
Všechny připojovací prvky vznikaly stejným způsobem. Jako příklad je uvedena tvorba modelu FRP42-H121K. Připojovací prvek je složen ze tří hlavních částí spojených šrouby.

Součást FRP42-H121K\_zakladna byla vytvořena následujícím postupem. Nejprve byl pomocí nástroje „Přidat vysunutím“ a „Odebrat vysunutím“ vytvořen základní tvar. Poté byly vytvořeny díry a to nástrojem „Průvodce dírami“. Na díry na boční straně byl použit nástroj „Zrcadlit“. Na závěr byl použit nástroj „Zaoblit“ na zaoblení vnitřních hran a nástroj „Zkosit“ na zkosení hran vnějších (Obr. 22).



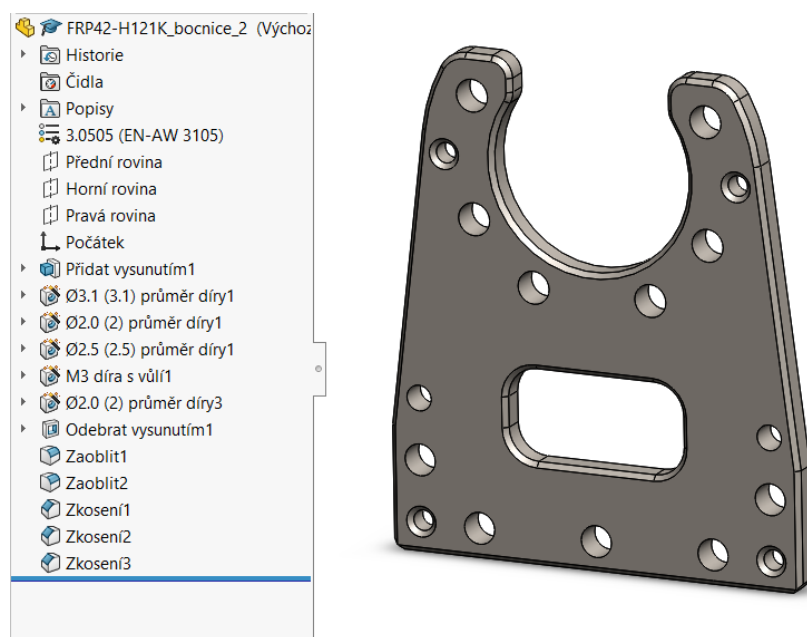
Obr. 22 FRP42-H121K\_zakladna

U součásti FRP42-H121K\_bocnice\_1 byl nejprve nástrojem „Přidat vysunutím“ vytvořen hlavní obrys. Dále byly nástrojem „Průvodce dírami“ vytvořeny díry. Poté bylo vytvořeno vysunutí ve středu součásti. Nástroji „Zaoblit“ a „Zkosení“ byla součást dokončena (Obr. 23).



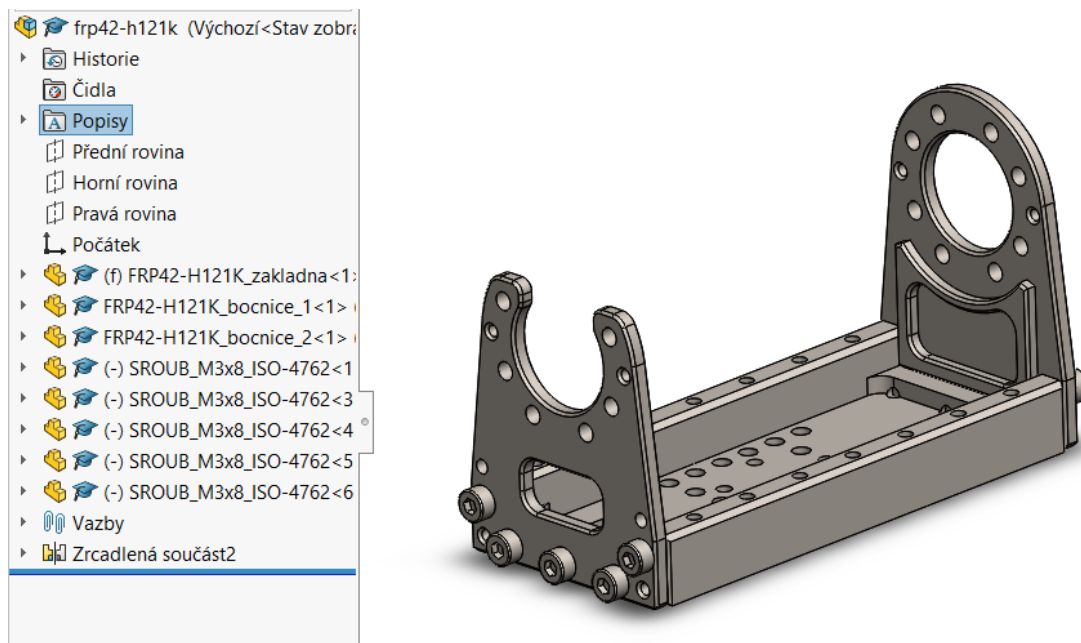
Obr. 23 FRP42-H121K\_bocnice\_1

Součást FRP42-H121K\_bocnice\_2 byla vytvořena stejným postupem jako FRP42-H121K\_bocnice\_1 (Obr. 24).



Obr. 24 FRP42-H121K\_bocnice\_2

Po založení sestavy FRP42-H121K byla nejprve přidána součást základna, která byla nastavená jako „pevná“. Dále byly do sestavy vloženy díly bocnice\_1 a bocnice\_2 a pomocí vazby „sjednocení“ byly přiřazeny k součásti základna. Nakonec byly do sestavy vloženy šrouby a vazbami „Soustředná“ a „Sjednocená“ byly uchyceny do příslušných děr (Obr. 25).

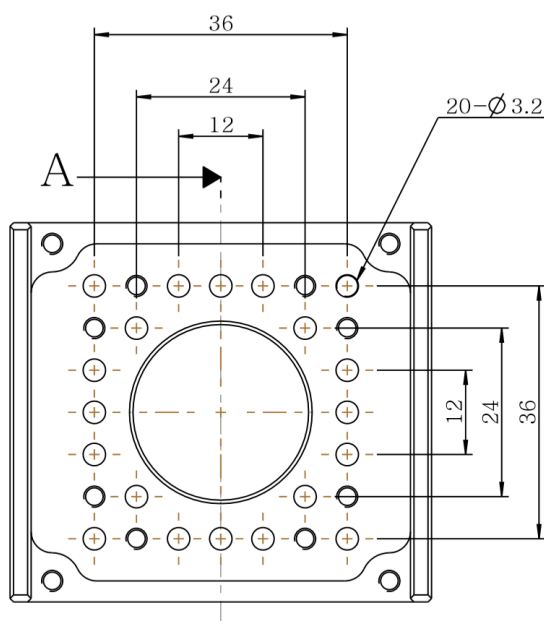


Obr. 25 FRP42-H121K – sestava

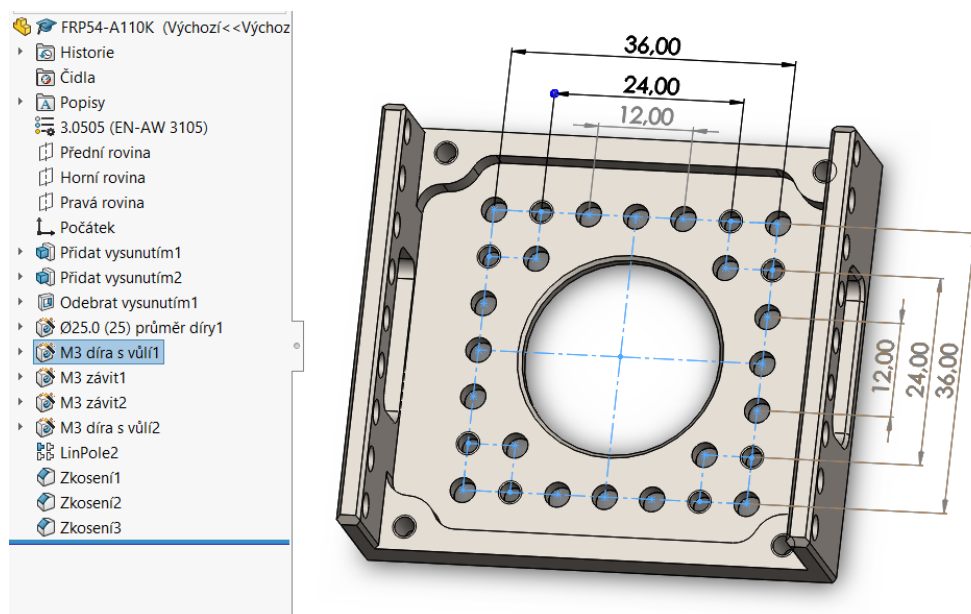
Všem přípojovacím prvkům byl přiřazen materiál hliník o hustotě  $2710 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Šroubům byl přiřazen materiál ocel. Proč se postupovalo právě takhle je popsáno na konci kapitoly 2.2.

### 3.3 Zobrazení kót v 3D modelu

Nástroj programu SolidWorks „Průvodce dírami“ umožňuje snadné vytvoření více děr řízených skicou. Díky tomu jsem se rozhodl na spojovacích prvcích a přírubách pohonů vytvářet pole více děr právě přes skicu, díky čemuž jsem do modelu mohl zanést kóty obdobným způsobem jako jsou zakótované výkresy. Kliknutím ve stromě modelu na příslušnou díru je možno kóty zobrazit. Zobrazení kót v modelu a na výkresu můžeme porovnat na Obr. 26 a Obr. 27.



Obr. 26 FRP54-A110K – výřez výkresu [6]



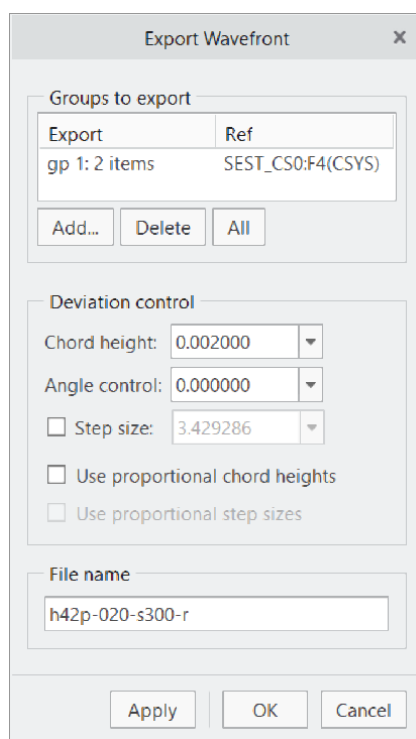
Obr. 27 FRP54-A110K – model, skica s kótami

## 4 Simulační modely v prostředí V-Rep

Všechny pohony a připojovací prvky Dynamixel PRO byly rovněž vytvořeny i ve V-Repu. Při tvorbě simulačních modelů byly jako vstupy využity již vytvořené 3D modely v CAD systému Creo. Tvorba modelů je opět vysvětlena na konkrétním pohonu a konkrétním připojovacím prvku.

### 4.1 Tvorba pohonu H42P-020-S300-R

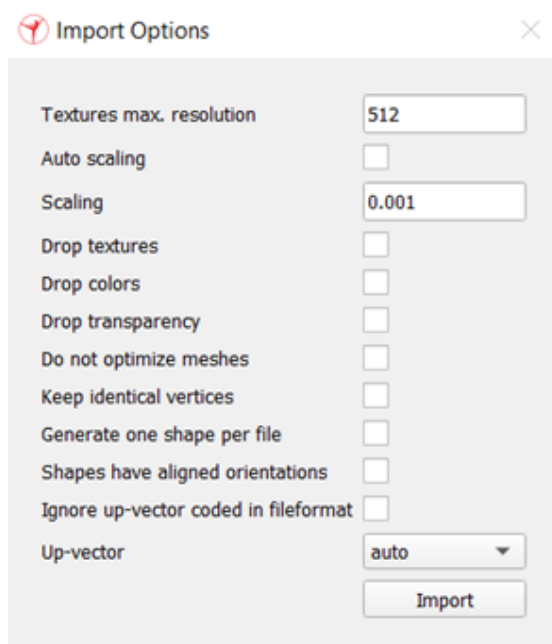
Prvním krokem při tvorbě simulačních modelů pohonů ve V-Repu bylo vytvoření upraveného modelu v systému Creo. Úprava spočívala ve vytvoření mezery 0,5 mm mezi částmi tělo a příruba. Mezeru bylo potřeba vytvořit z toho důvodu, že během simulace může dojít k nepatrnému vzájemnému posunutí částí a následné kolizi. Následně byl model nástrojem „Save a Copy“ uložen do formátu Wavefront (.OBJ) (Obr. 28).



Obr. 28 Creo – ukládání formátu Wavefront

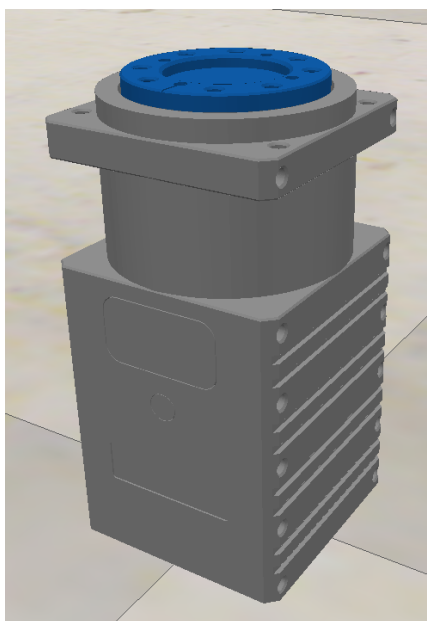
Dále byl model přenesen do V-Repu a to pomocí nástroje „Import – Mesh...“. Po zvolení nástroje byl vybrán příslušný soubor s příponou .OBJ. Poté bylo potřeba v okně „Import Options“ zvolit měřítko „Scaling“, které bylo nastaveno na 0,001 a to z důvodu, že V-Rep pracuje v metrech, ale vkládaný model má základní jednotku milimetr. Vše ostatní v okně „Import Options“ bylo necháno neoznačeno (Obr. 29).





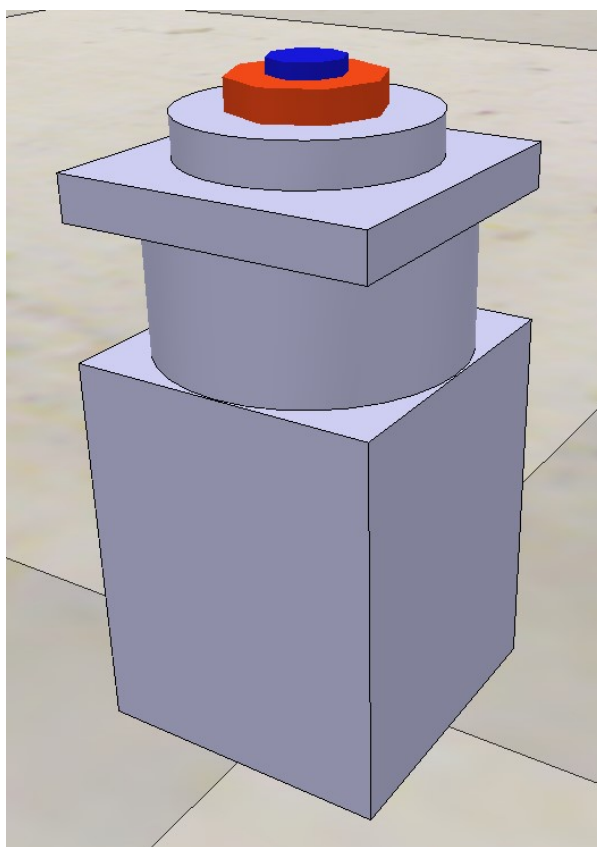
Obr. 29 V-Rep – Import Options

Po potvrzení tlačítkem „Import“ byly do scény V-Repu vloženy dva objekty odpovídající částem tělo a příruba (Obr. 30). Takto vytvořené objekty jsou typu „Simple random shape“, který není ve V-Repu doporučen pro simulace dynamických vlastností. Objekt se skládá z příliš velkého množství prvků a simulace by byla pomalá a nestabilní. Proto vytvořené objekty jsou pouze statické a dynamická část modelu bude vytvořena z jednodušších tvarů. Statická část modelu bude reprezentovat vizuální stránku, popř. může sloužit pro detekci kolizí.



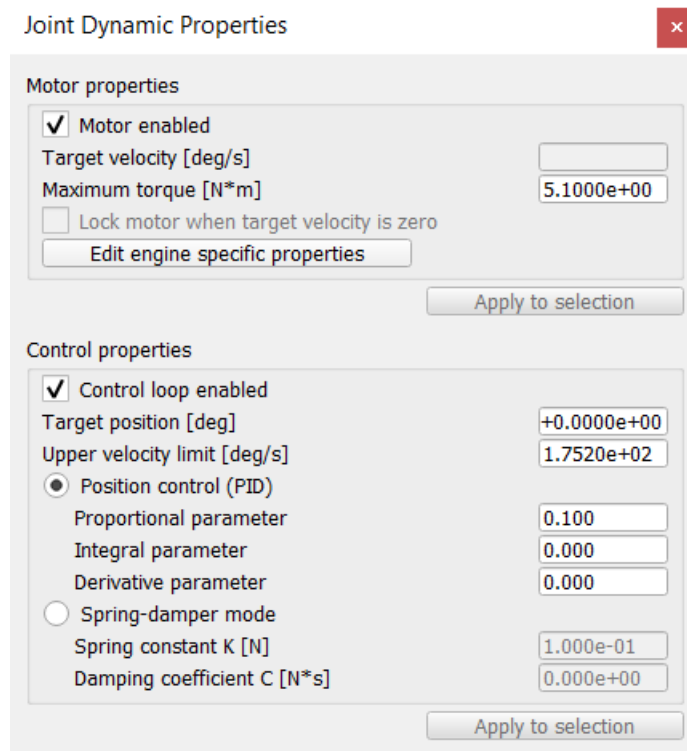
Obr. 30 V-Rep – statická část modelu

Vkládáním základních tvarů byla vytvořena dynamická část modelu. Objekty byly do scény vkládány tak, aby kopírovaly původní tvar pohonu, ale zároveň jej dostatečně zjednodušily. Základní tvary se do scény vkládají kliknutím pravým tlačítkem a poté zvolením „Add – Primitive shape“. Objekt tělo byl vytvořen použitím nástrojů „Cuboid“ a „Cylinder“. Takto vytvořené objekty byly po posunutí na příslušnou pozici v prostoru spojeny dohromady nástrojem „Group selected shapes“. Součást příruba byla vytvořena nástrojem „Cylinder“ a rovněž byla posunuta na příslušnou pozici v prostoru. Rozměry potřebné pro tvorbu dynamické části modelu byly měřeny na modelu v systému Creo. Tímto postupem vytvořený dynamický model je již vhodný pro dynamické simulace (Obr. 31).



Obr. 31 Creo – dynamická část modelu

Do scény byl rovněž příkazem „Add – Joint – Revolute“ vložen spoj reprezentující motor. V nastavení vlastností prvku byl nastaven maximální moment a rychlost, kterou se pohon může otáčet (Obr. 32).



Obr. 32 Nastavení vlastností motoru

Hmotnostní vlastnosti byly modelu v systému V-Rep přiřazeny tak, aby byly shodné s hmotnostními vlastnostmi v systému Creo.

Hmotnostní vlastnosti byly zvlášť přiřazeny součásti tělo a zvlášť příruba. Hmotnost součásti H42P-020-S300-R\_telo byla v systému Creo zjištěna pomocí nástroje „Mass properties“ a v systému V-Rep přiřazena součásti H42P\_020\_S300\_R\_telo\_dyn.

Těžiště a momenty setrvačnosti jsou v systému V-Rep určeny ke středu souřadného systému scény. Proto byl v systému Creo vytvořen pomocný souřadný systém shodný se souřadným systémem scény v systému V-Rep a od tohoto souřadného systému byla nástrojem „Mass Properties“ zjištěna poloha těžiště a momenty setrvačnosti k těžišti (Obr. 33).

Polohu těžiště bylo potřeba převést z milimetrů na metry.

```

VOLUME = 1.2960798e+05 MM^3
SURFACE AREA = 1.9939289e+04 MM^2
DENSITY = 2.5352056e-06 KILOGRAM / MM^3
MASS = 3.2858288e-01 KILOGRAM

CENTER OF GRAVITY with respect to CS1 coordinate frame:
X Y Z 0.0000000e+00 1.2624202e-02 3.8287296e+01 MM

INERTIA with respect to CS1 coordinate frame: (KILOGRAM * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 6.9608116e+02 0.0000000e+00 0.0000000e+00
Iyx Iyy Iyz 0.0000000e+00 6.9560983e+02 -1.0830627e-01
Izx Izy Izz 0.0000000e+00 -1.0830627e-01 9.0017353e+01

INERTIA at CENTER OF GRAVITY with respect to CS1 coordinate frame: (KILOGRAM * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 2.1440587e+02 0.0000000e+00 0.0000000e+00
Iyx Iyy Iyz 0.0000000e+00 2.1393460e+02 5.0513141e-02
Izx Izy Izz 0.0000000e+00 5.0513141e-02 9.0017300e+01

PRINCIPAL MOMENTS OF INERTIA: (KILOGRAM * MM^2)
I1 I2 I3 9.0017280e+01 2.1393462e+02 2.1440587e+02

```

Obr. 33 Creo – hmotnostní vlastnosti

V systému Creo jsou momenty setrvačnosti uvedeny s jednotkou  $[kg \cdot mm^2]$ , ale do V-Repu je potřeba momenty setrvačnosti zadat vydělené hmotností, tedy s jednotkou  $[m^2]$ . Momenty setrvačnosti jsou přepočteny následující rovnicí:

$$I_{V-rep} = \frac{I_{Creo}}{m} \cdot 10^{-6} \quad (4.1)$$

kde  $I_{V-rep}$  je moment setrvačnosti zadávaný do V-Repu,

$I_{Creo}$  je moment setrvačnosti převzatý z Crea,

$m$  je hmotnost součásti.

Přepočtené hodnoty momentů setrvačnosti a hodnoty polohy těžiště pak byly zadány do V-Repu a to přes „Show dynamic properties dialog – Set inertia matrix and COM relative to absolute frame“ což otevře okno s „Inertia Matrix & Center of Mass“, do kterého je možno hodnoty zadat (Obr. 34).

Inertia Matrix & Center of Mass

Relative to the absolute frame

Inertia matrix divided by the mass [m<sup>2</sup>]

+6.530e-04	+0.000e+00	+0.000e+00
+0.000e+00	+6.510e-04	+1.540e-07
+0.000e+00	+1.540e-07	+2.740e-04

Position of the center of mass

X [m]	+0.000e+00
Y [m]	+1.260e-05
Z [m]	+3.830e-02

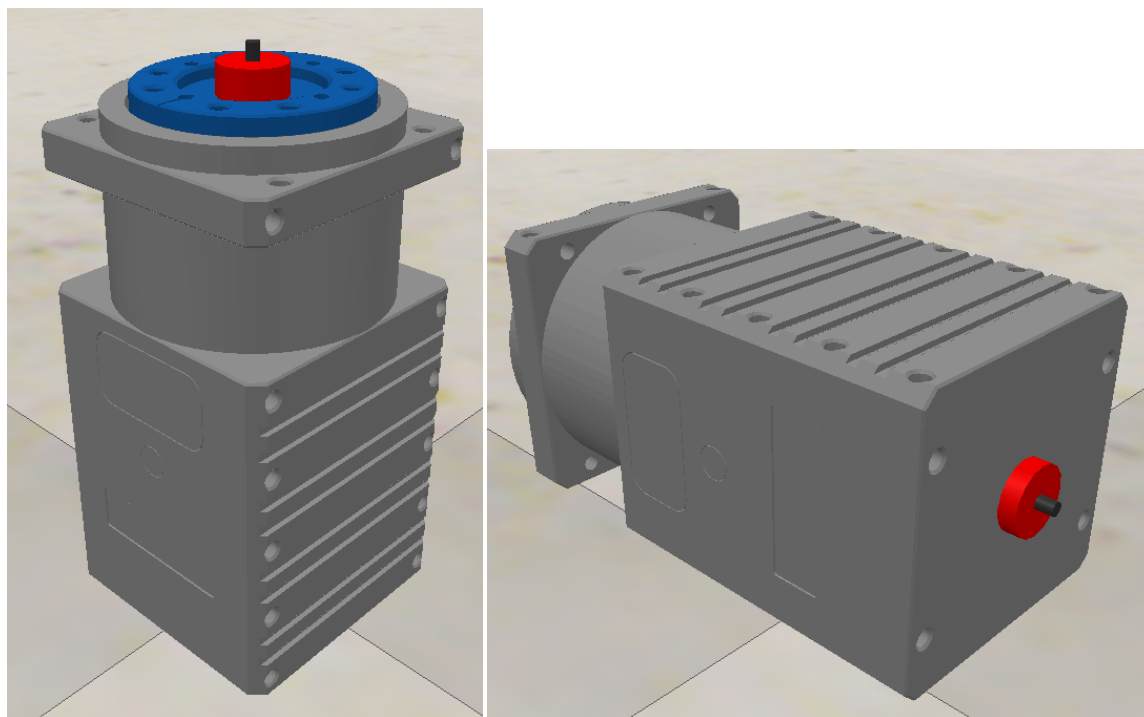
☐ Apply to selected shapes

OK Cancel

Obr. 34 V-Rep – poloha těžiště a momenty setrvačnosti

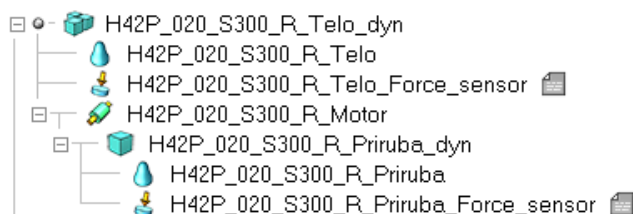
Stejně se postupovalo i při přiřazení hmotnostních vlastností objektu H42P\_020\_S300\_R\_přiruba\_dyn.

Rovněž byl do scény dvakrát vložen „Force sensor“. Jeden umístěný na horní straně příruby a druhý na spodní straně těla. Objekt „Force sensor“ slouží pro sestavování jednotlivých modelů knihovny dohromady (Obr. 35).



Obr. 35 Umístění prvku "Force sensor" na přírubě a těle

Jednotlivé vytvořené objekty jsou přiřazeny k sobě tak, aby na sebe navazovaly vždy dva dynamické. Díky tomuto kroku již budou jednotlivé prvky spojeny dohromady a po zapnutí simulace se model nerozpadne. Rovněž byly jednotlivé objekty modelu přejmenovány (Obr. 36).

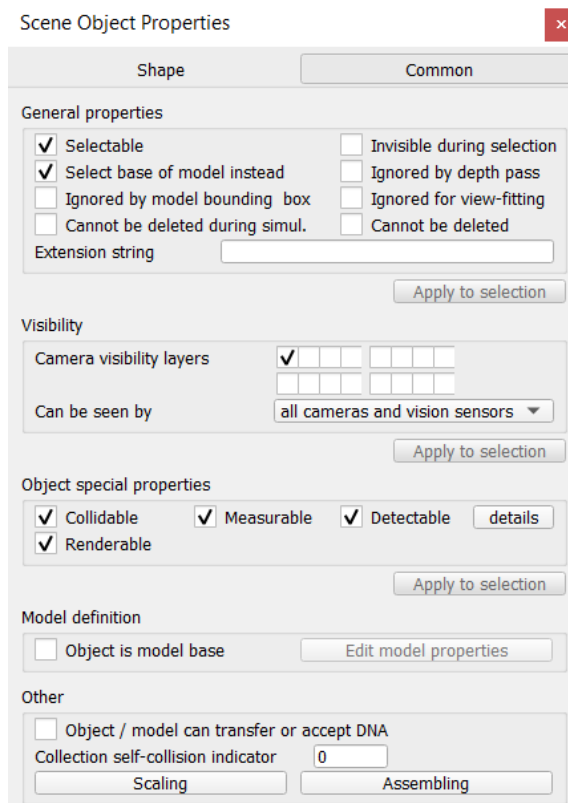


Obr. 36 V-Rep – hierarchie modelu

Objektům H42P\_020\_S300\_R\_Telo a H42P\_020\_S300\_R\_Priruba byly nastaveny tyto vlastnosti: „Collidable“, „Measurable“, „Detectable“ a „Renderable“. Vlastnosti byly nastaveny přes „Scene Object Properties“ v záložce „Common“.

Rovněž byla objektům změněna viditelnost, aby se dalo jednoduše přepínat mezi statickou a dynamickou částí modelu. Nastavení viditelnosti bylo provedeno v nastavení „Scene Object Properties“ v záložce „Common“.

Taktéž byl objekt H42P\_020\_S300\_R\_Telo\_dyn nastaven jako „Object is model base“. Všem ostatním objektům bylo nastaveno „Select base of model instead“ (Obr. 37). Toto je potřeba udělat proto, aby bylo možné model uložit a bylo ho možné importovat jako celek do nové scény. [8]



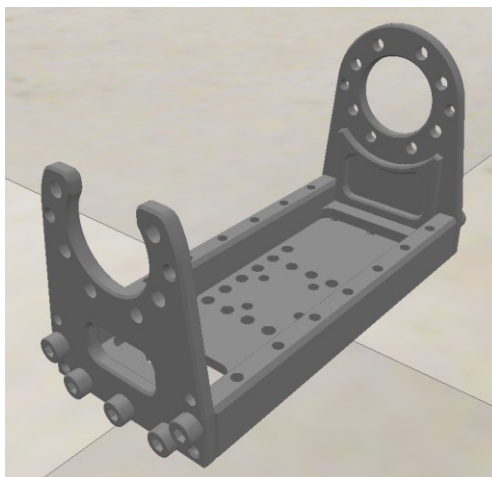
Obr. 37 V-Rep – nastavení objektu H42P\_020\_S300\_R\_Telo

Poslední krok je uložení modelu. Byl označen objekt H42P\_020\_S300\_R\_Telo\_dyn a přes „File – Save model as – CoppeliaSim model ...“ bylo zahájeno ukládání modelu. Dále bylo potvrzeno, že současná poloha bude použita při vkládání modelu do scény. Nakonec byl nastaven náhledový obrázek modelu a složka pro uložení.

## 4.2 Tvorba připojovacího prvku FRP42-H121K

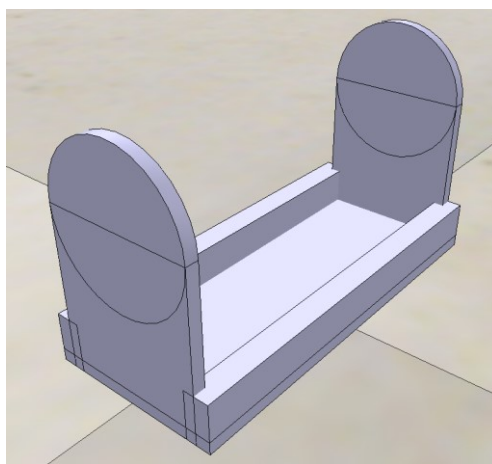
Tvorba většiny připojovacích prvků byla snadnější než tvorba pohonů. A to z toho důvodu, že připojovací prvky, až na dvě výjimky, nemají pohyblivé části. Připojovací prvky se skládají pouze ze statické části, dynamické části a Force sensoru.

Statická část modelu byla vytvořena stejným postupem jako u již popsaného pohonu (Obr. 38).



Obr. 38 V-Rep – statická část modelu FRP42-H121K

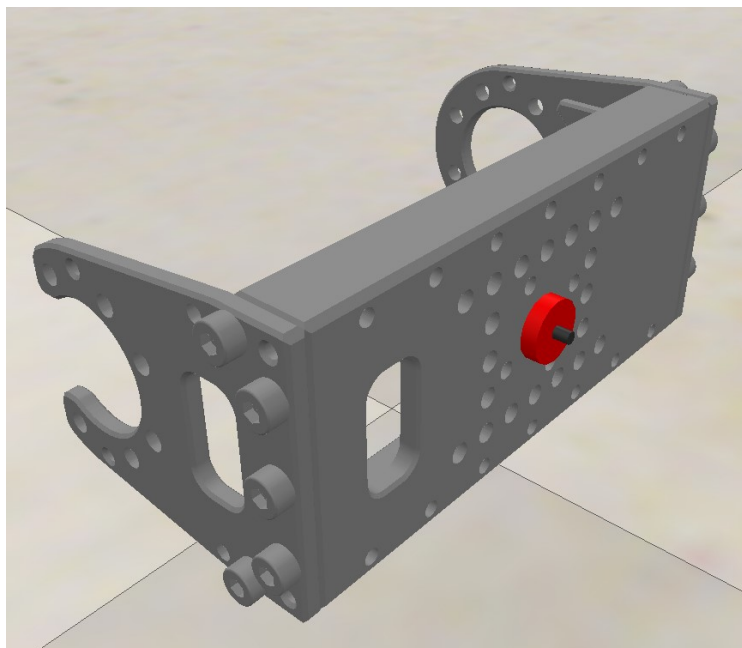
Dynamický model byl opět vytvořen ze základních geometrických tvarů. Model byl vytvořen z pěti kvádrů vkládaných do scény nástrojem „Add – primitive shape – Cuboid“. Dále pak byly vloženy i dva válce, a to nástrojem „Add – primitive shape – Cylinder“. Jednotlivé objekty byly podle potřeby natočeny, popř. posunuty, a to nástroji „Object/item shift“ a „Object/item rotate“. Poté byly jednotlivé prvky dynamické části modelu spojeny dohromady nástrojem „Group selected shapes“ (Obr. 39).



Obr. 39 V-Rep – dynamická část modelu FRP42-H121K

Do scény ve V-Repu byl rovněž přidán objekt „Force senzor“, který umožňuje spojení modelu s dalšími spojovacími prvky, případně pohony (Obr. 40).





Obr. 40 V-Rep – umístění prvku "Force sensor"

Jednotlivé vytvořené objekty byly přiřazeny k sobě a přejmenovány (Obr. 41). Stejně jako u pohonů byly přes „Scene Object Properties“ v záložce „Common“ nastaveny vlastnosti objektů.



Obr. 41 V-Rep – hierarchie modelu

Na závěr byl model uložen, a to postupem popsáním výše.

## 5 Návrh manipulátoru

Z pohonů Dynamixel PRO je možné vytvořit celou řadu robotických systémů, například humanoidní roboty, roboty kopírující pohyb určitého zvířete, popřípadě nejrůznější manipulátory. Právě postup vytvoření manipulátoru pomocí knihovny pohonů je popsán v následující kapitole. Tvorba manipulátoru v systému SolidWorks je téměř totožná s tvorbou v systému Creo, a proto v práci nebude blíže popsána.

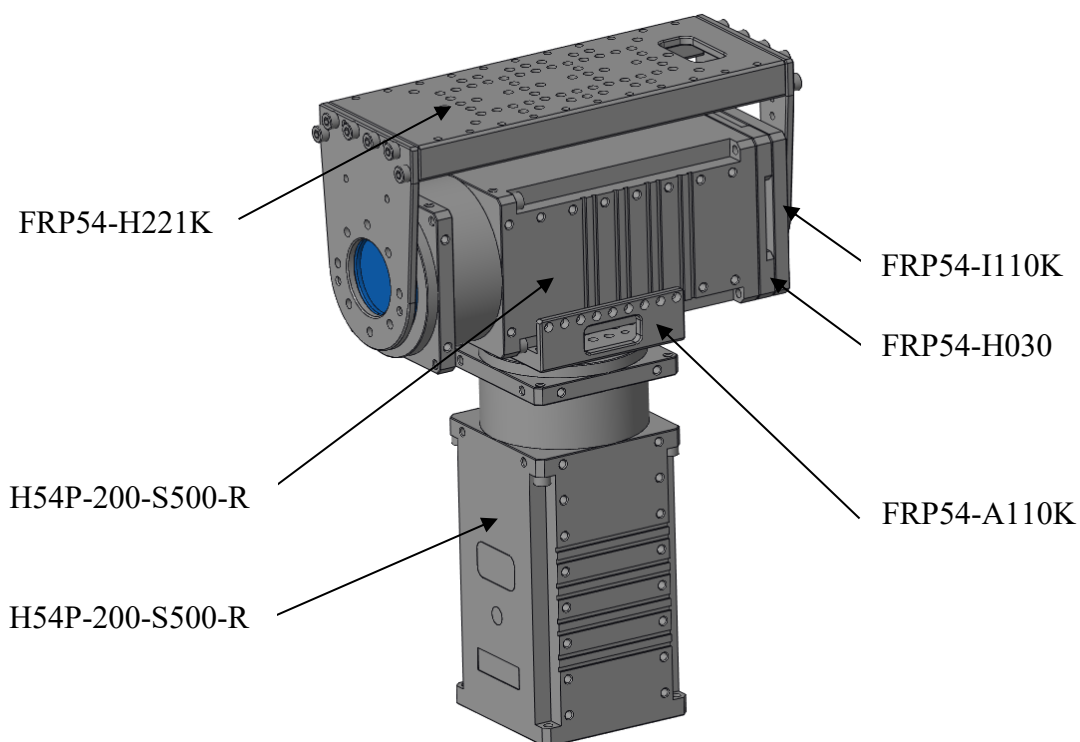
Jako vzor při tvorbě manipulátoru posloužil OPENMANIPULATOR-PRO od společnosti Robotis. Tento manipulátor je sestaven z pohonů DYNAMIXEL PRO a speciálně upravených spojovacích prvků. Protože OPENMANIPULATOR-PRO používá nestandardní spojovací prvky, nebylo možné ho pomocí vytvořené knihovny sestavit. Pomocí vytvořené knihovny bylo ale možné sestavit manipulátor velice podobný.

### 5.1 Tvorba manipulátoru v CAD systému Creo

Sestava manipulátoru se skládá ze tří podsestav kloubů a dvou nosných ramen. Jednotlivé podsestavy kloubů byly sestaveny pomocí knihovny pohonů. Ramena byla vytvořena jako nové součásti.

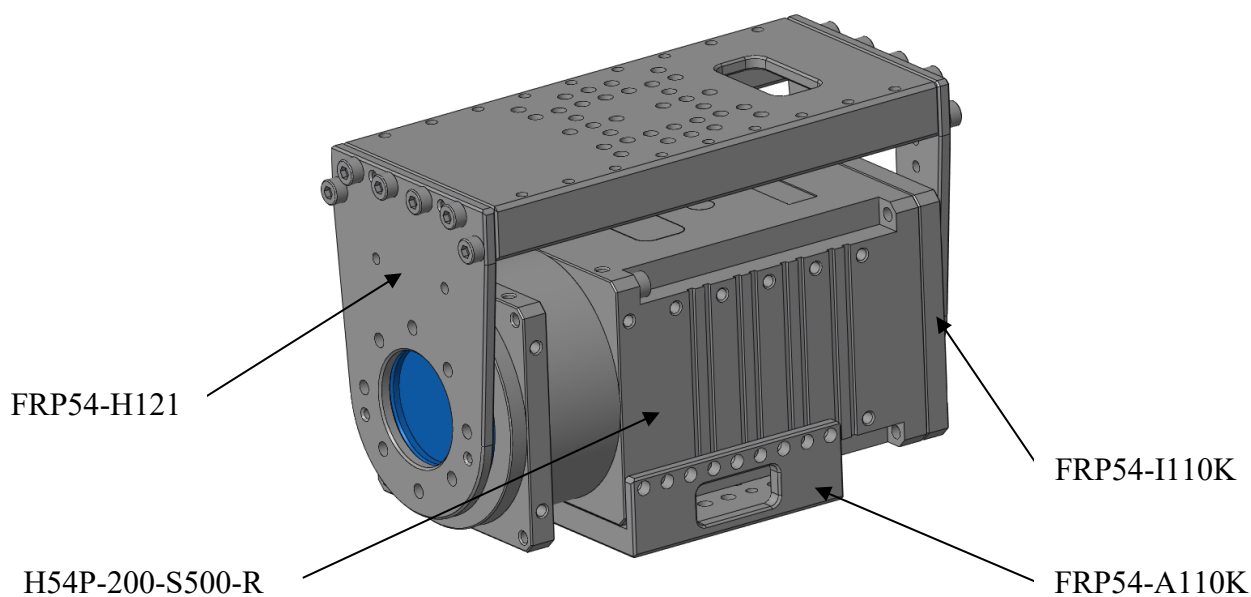
Pro správné definování sestavy musí být určena pozice součástí v prostoru, a to u rovinných součástí třemi vazbami a u válcových dvěma vazbami. [9]

Podsestava manipulátoru s označením KLOUB\_1\_2 byla vytvořena následujícím postupem. Do sestavy byla vložena sestava pohonu H54P-200-S500-R a její poloha byla nastavena na „Default“. Dále byl do sestavy vložen díl FRP54-A110K a dvěma vazbami „Coincident“ byl připojen k přírubě pohonu H54P-200-S500-R. Poté byl do sestavy vložen další pohon H54-200-S500-R. Pohon byl dvěma vazbami „Coincident“ a jednou vazbou „Oriented“ připojen k dílu FRP54-A110K. Poté byly k pohonu vazbami „Coincident“ připojeny připojovací prvky FRP54-H030 a FRP54-I110K. Poslední prvek vložený do podsestavy kloubu byl FRP54-H221. Tento prvek byl připojen k přírubě pohonu, a to vazbami „Coincident“ a „Oriented“ (Obr. 42).



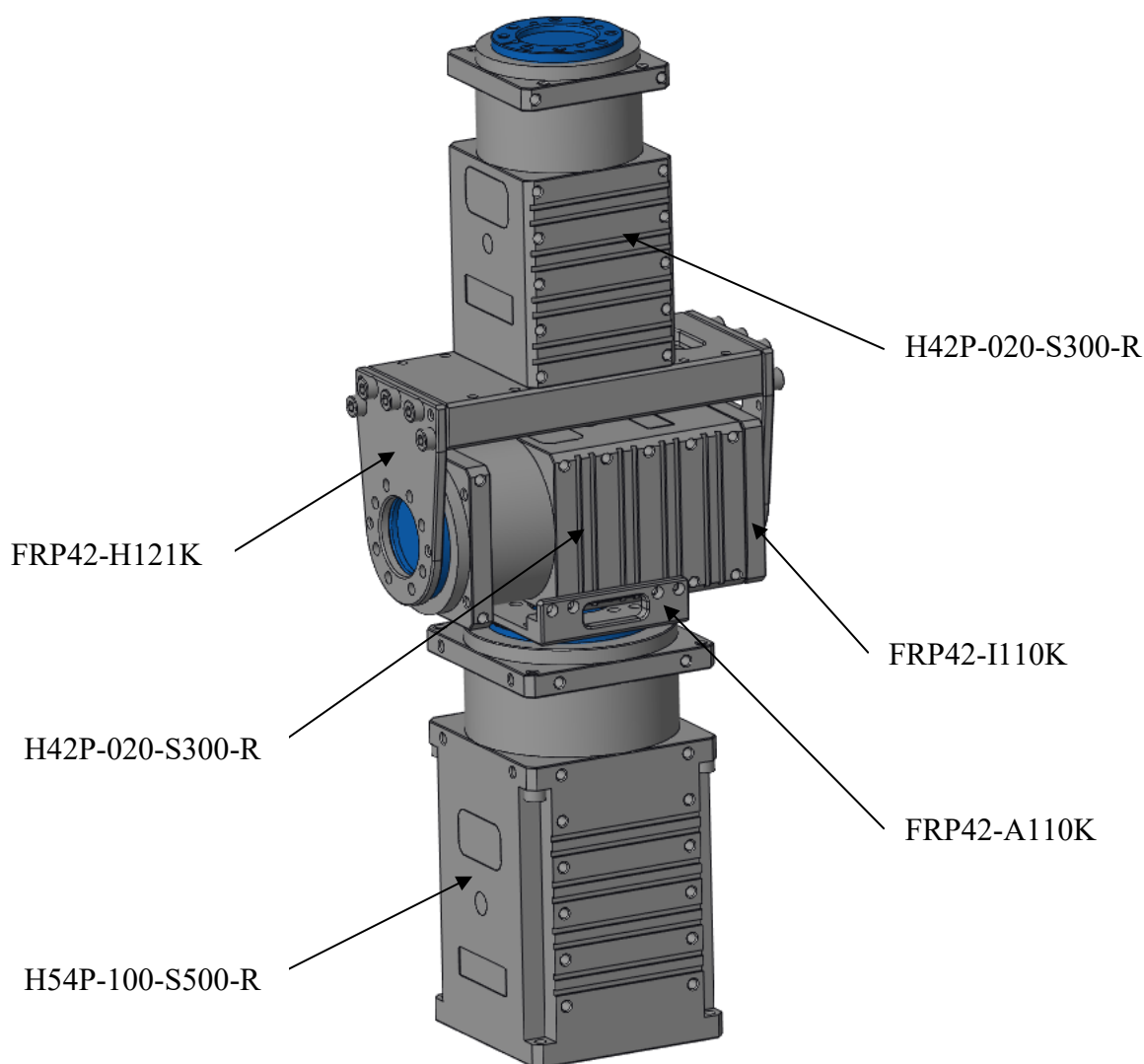
Obr. 42 Manipulátor – KLOUB\_1\_2

Podsestava manipulátoru KLOUB\_3 vznikla následujícím postupem. Do sestavy byl vložen pohon H54P-100-S500-R, k němu byl následně připojen prvek FRP54-A110K, a to vazbami „Coincident“. Dále byl vazbami „Coincident“ k pohonu připojen prvek FRP54-I110K. Nakonec byl k pohonu připojen prvek FRP54-H121K a to vazbami „Coincident“ a „Orient“ (Obr. 43).



Obr. 43 Manipulátor – KLOUB\_3

Poslední podsestava KLOUB\_4\_5\_6 byla vytvořena obdobným postupem jako dvě předchozí. Nejprve byl do sestavy vložen pohon H54P-100-S500-R. K tomuto pohonu byl následně připojen prvek FRP42-A110K, a to pomocí vazeb „Coincident“ a „Oriented“. Dále byl do sestavy vložen pohon H42P-020-S300-R a pomocí vazeb „Coincident“ a „Oriented“ uchycen k připojovacímu prvku FRP42-A110K. K pohonu H42P-020-S300-R byl vazbami „Coincident“ připojen prvek FRP42-I110K a vazbami „Coincident“ a „Oriented“ připojovací prvek FRP42-H121K. Na závěr byl do sestavy vložen pohon H42P-020-S300-R a vazbami „Coincident“ a „Oriented“ byl připojen k prvku FRP42-H121K (Obr. 44).

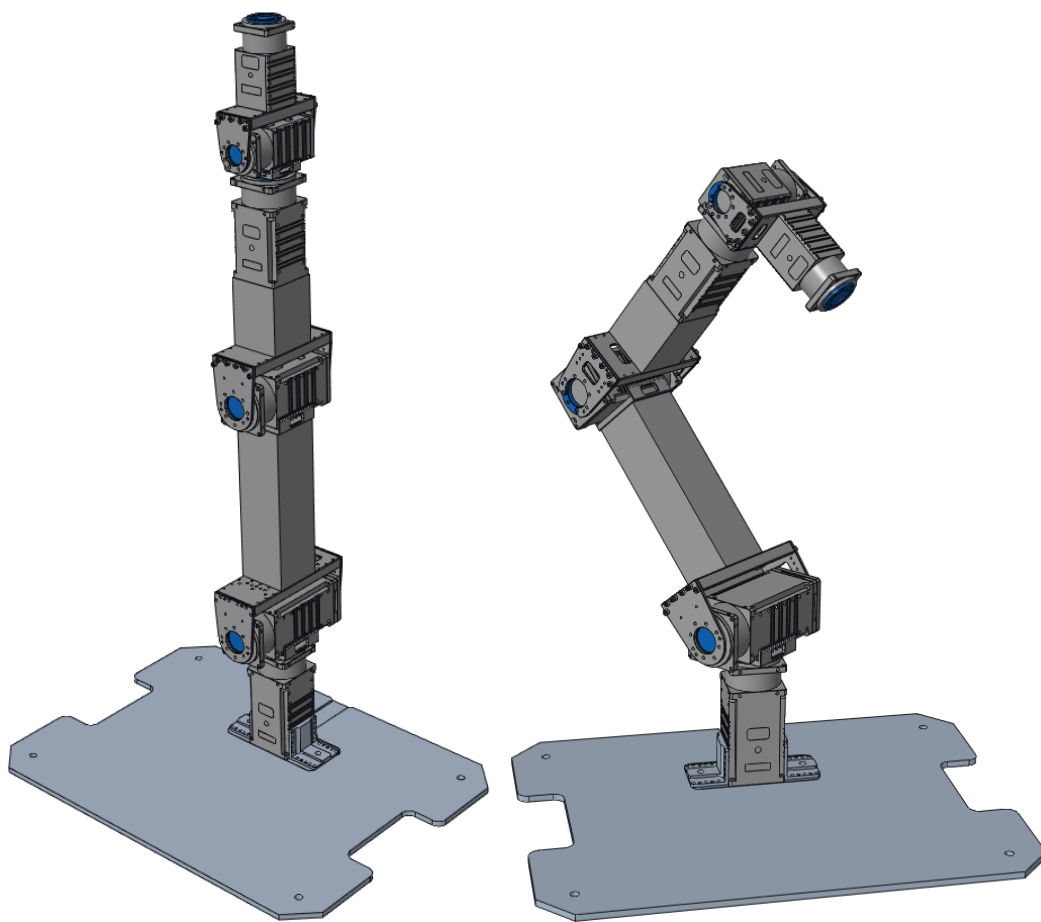


Obr. 44 Manipulátor – KLOUB\_4\_5\_6

Dále byla vytvořena dvě nosná ramena, která spojují jednotlivé klouby. Ramena byla vytvořena založením nového dílu a použitím nástroje „Extrude“.

Nakonec byla založena nová sestava. Do této sestavy byla vložena základní deska (base\_plate\_01) a připojovací díl (manipulator-angle), tyto díly je možné stáhnout ze stránek výrobce pohonů. Základní desce byla nastavena poloha na „Default“ a připojovací díl byl k desce připojen vazbami „Coincident“. Dále byla do sestavy vložena dvě ramena a podsestavy jednotlivých kloubů, které byly postupně přiřazeny příkazy „Coincident“.

Celkovou sestavu manipulátoru můžeme vidět na Obr. 45 vlevo. Na pravé straně Obr. 45 je manipulátor znázorněn v obecné poloze.



Obr. 45 Manipulátor

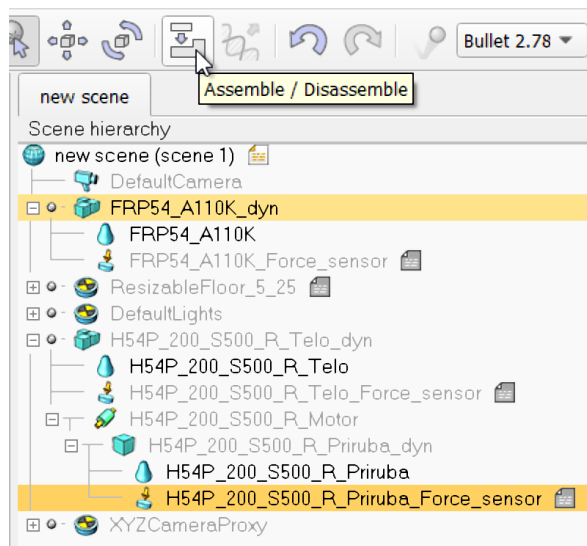
## 5.2 Tvorba manipulátoru v simulačním prostředí V-Rep

Manipulátor vytvořený v systému V-Rep je shodný s manipulátorem vytvořeným v systému Creo. Díky přichystané knihovně modelů je vytvoření manipulátoru velice rychlé. Pouze několika kliky myši je možno pohony a připojovací prvky skládat dohromady.

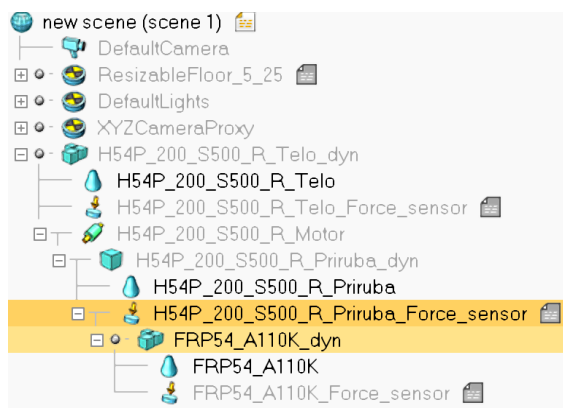
Připravené modely lze uložit do příslušné složky, ve které jsou uloženy ukázkové modely systému V-Rep. Následné vkládání modelů do scény je pak velice jednoduché. Kliknutím a podržením na příslušný model je možné ho vložit do scény.

Nejprve byl do scény vložen model H54P-200-S500-R. Modelu byly nastaveny souřadnice x a y na nulu, díky tomu bude umístěn ve středu souřadného systému.

Dále byl na libovolné místo scény vložen model připojovacího prvku FRP54A-110K. Následně byl kliknutím myši označen nejvyšší prvek modelu, a to konkrétně FRP54A-110K\_dyn. Poté byl přes stisknutou klávesu Ctrl označen prvek H54P-200-S500-R\_Přiruba\_Force\_sensor. Po označení obou příslušných prvků byl vybrán nástroj „Assemble“ (Obr. 46). Po vybrání nástroje „Assemble“ je prvek FRP54A-110K v prostoru umístěn na přírubu, a rovněž je v hierarchii modelu podržazen pod vybraný force sensor. Po startu simulace již budou prvky držet pohromadě (Obr. 47).

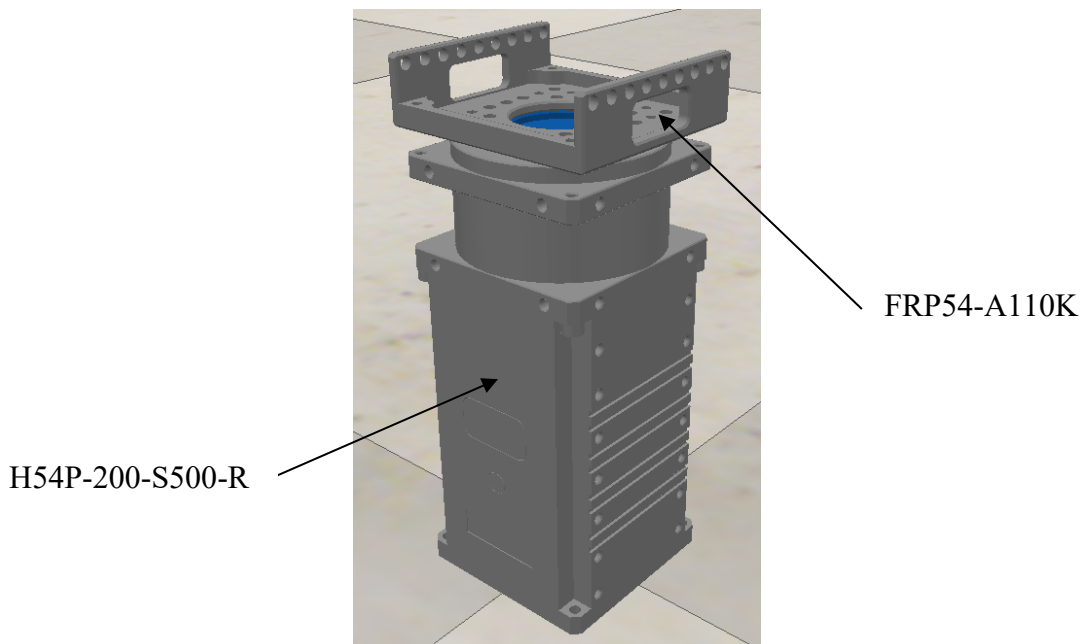


Obr. 46 V-Rep – označení prvků



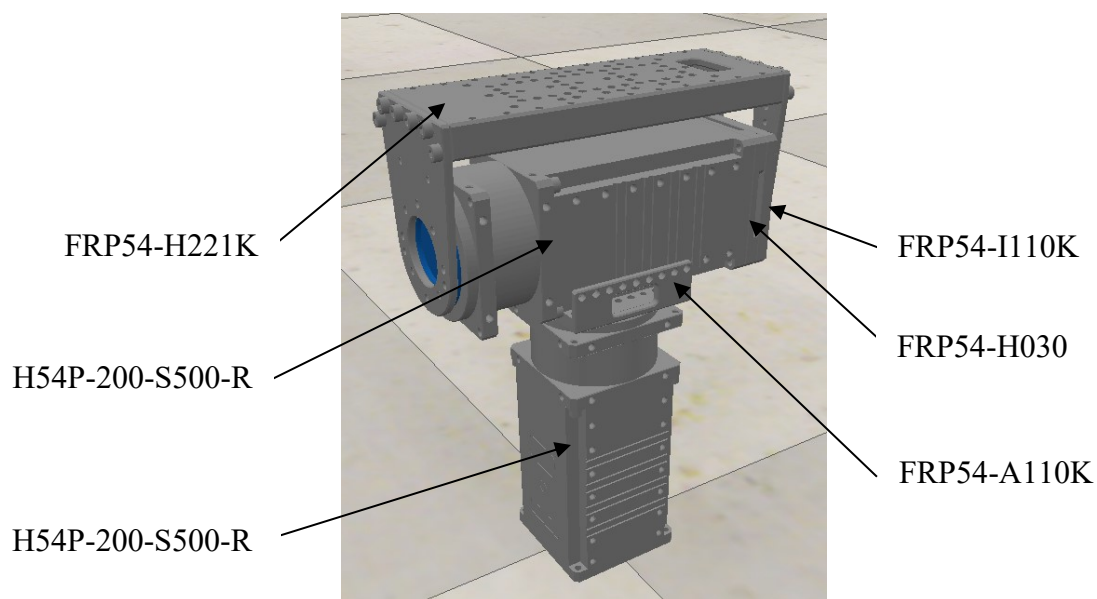
Obr. 47 V-Rep – prvky podrženy

Na Obr. 48 můžeme vidět pohon H54P-200-S500-R a k němu připojený spojovací prvek FRP54-A110K.



Obr. 48 V-Rep – pohon + připojovací prvek

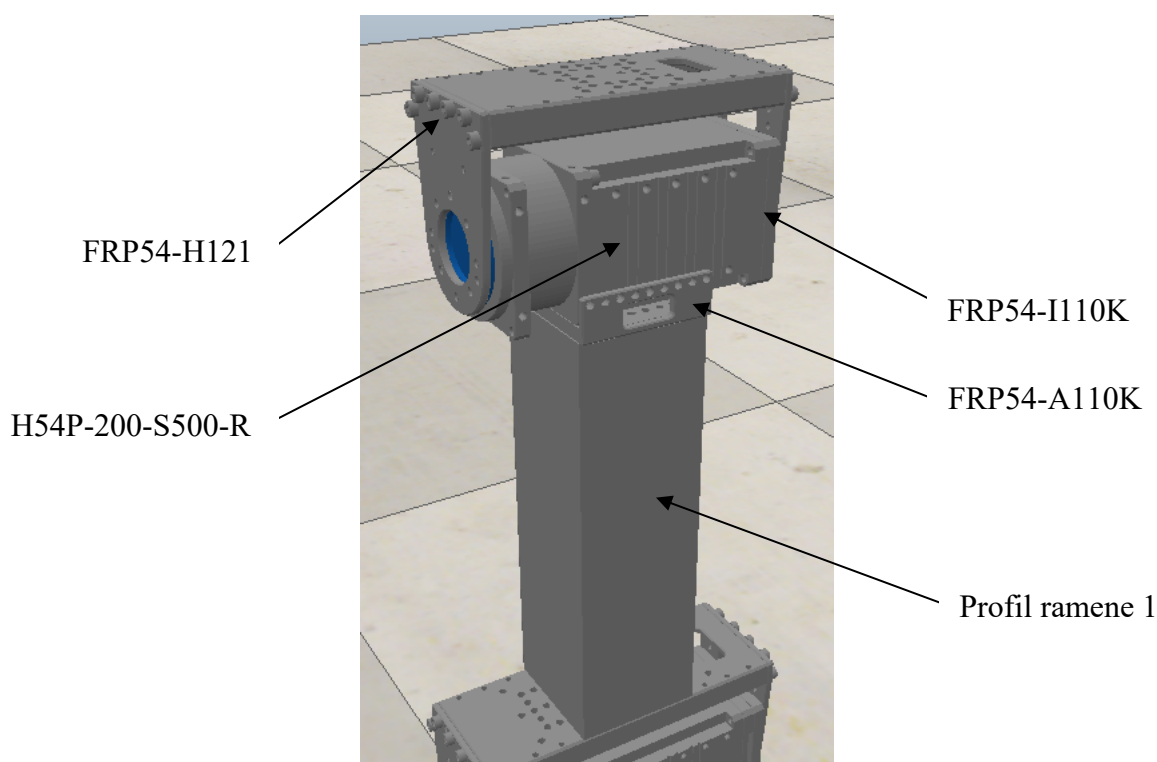
Stejným postupem byl do scény vložen další pohon H54P-200-S500-R. Po použití nástroje „Assemble“ není pohon ještě správně umístěn a je potřeba ho podél jedné osy posunout na příslušnou pozici. Dále byly do scény vloženy spojovací prvky FRP54-H030, FRP54-I110K a FRP54-H221K a opět nástrojem „Assemble“ připojeny k pohonu (Obr. 49).



Obr. 49 Postup tvorby manipulátoru 1

Dále byl vytvořen profil nosného ramene použitím příkazu „Add-Cuboid“. Prvek byl poté posunut v ose z tak, aby navazoval na přípojovací prvek FRP54-H221K. Poté byl nástrojem „Add-Force sensor“ přidán do scény force sensor, který byl posunut na horní plochu ramene. Oba vložené prvky byly i v hierarchii modelu podřazeny tak, aby vše na sebe navazovalo.

Dalším krokem bylo sestavení třetího kloubu. Do scény byl vložen a k nosnému rameni připojen prvek FRP54-A110K. K tomuto prvku byl připojen pohon H54P-100-S500-R. K pohonu byly poté připojeny spojovací prvky FRP54-I110K a FRP54-H121K (Obr. 50).

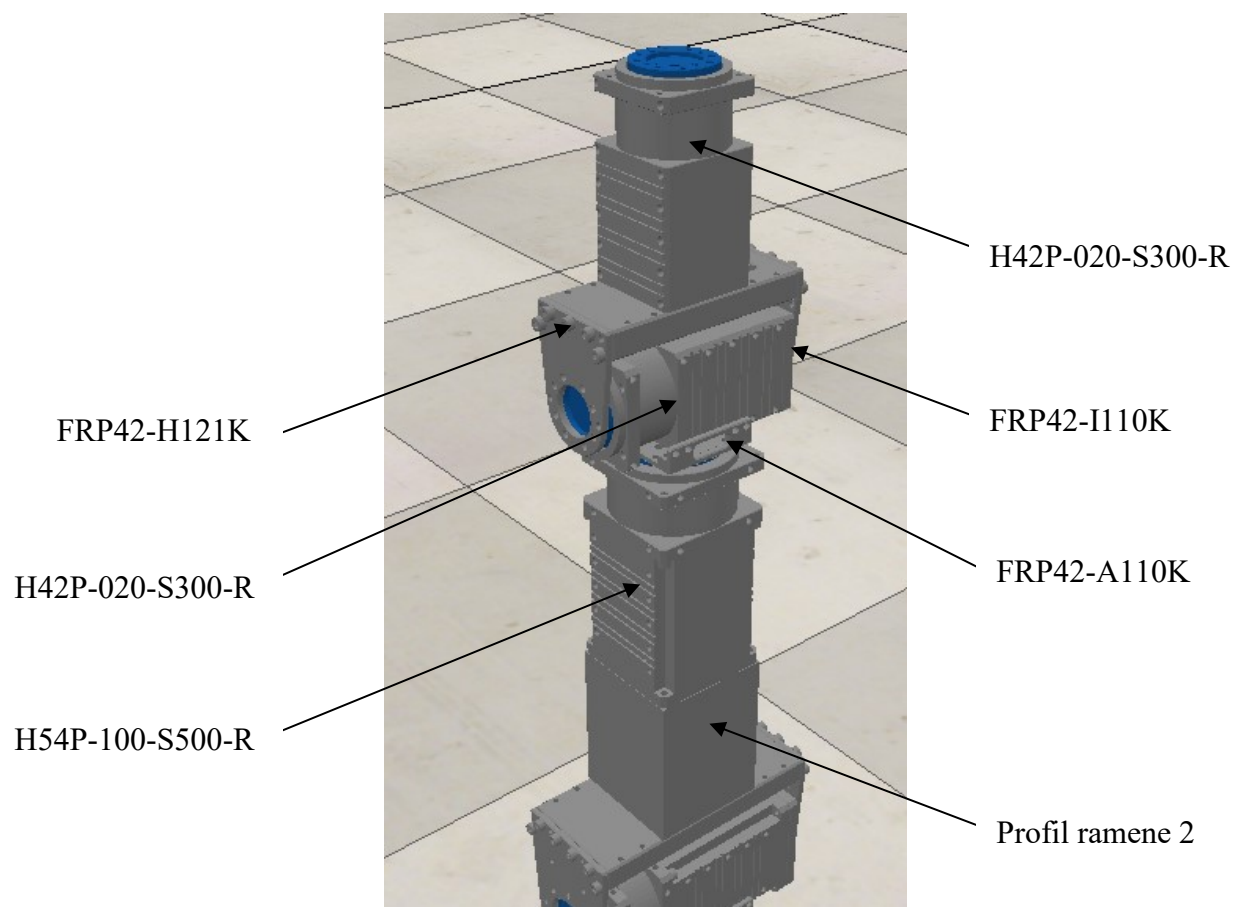


Obr. 50 Postup tvorby manipulátoru 2

Použitím nástroje „Add-Cuboid“ byl do scény vložen další profil nosného ramene, který byl umístěn tak, aby navazoval na poslední přípojovací prvek. Nástrojem „Add-Force sensor“ byl vytvořen force sensor, který byl umístěn na horní stranu nosného ramene.

Stejným postupem jako u tvorby předchozích kloubů bylo vytvořeno i orientační ústrojí manipulátoru. Nejprve byl přidán pohon H54P-100-S500-R, ke kterému byl připojen prvek FRP42-A110K. K tomuto prvku byl připojen pohon H42P-020-S300-R. K pohonu byly přiřazeny spojovací prvky FRP42-I110K a FRP42-H121K. K poslednímu zmíněnému prvku byl přiřazen pohon H42P-020-S300-R (Obr. 51).





Obr. 51 Postup tvorby manipulátoru 3

## **6 Náměty pro další rozšíření databáze modelů jednotek**

V této práci byla zpracována nejvyšší řada z nabídky servopohonů Dynamixel, které je v současné době možné zakoupit. Knihovnu by bylo možno rozšířit o řadu pohonů Dynamixel XC a XL, jež patří v porovnání s ostatními pohony mezi ty finančně dostupnější, nebo o pohony řady XH, které budou rovněž k dispozici na katedře robotiky.

Knihovnu by rovněž bylo možné rozšířit o šest dílů, které chybí k sestavení modelu manipulátoru OPENMANIPULATOR-PRO. Pomocí těchto dílů by bylo možné ve V-Repu vytvořit simulační model tohoto manipulátoru.

## 7 Závěr

Cílem práce bylo vytvořit knihovnu určených pohonů Dynamixel a jejich příslušenství pro CAD a simulační systémy.

K zadaným servopohonům byly dohledány dostupné informace. Informace o jednotlivých CAD a simulačních systémech jsou shrnuty v teoretická části práce.

Na základě získaných informací bylo vytvořeno šest modelů servopohonů Dynamixel PRO, a to v CAD systému Creo. Dále pak bylo v Creu vytvořeno devět přípojovacích prvků příslušících k řadě servopohonů Dynamixel PRO. Těchto patnáct modelů bylo taktéž vytvořeno v CAD systému SolidWorks.

Pomocí 3D modelů vytvořených v systému Creo byly vytvořeny i simulační modely pohonů a přípojovacích prvků v simulačním prostředí V-Rep. Kromě hmotnostních vlastností byly simulačním modelům pohonů nastaveny i maximální otáčky a moment, který je pohon schopný dodat.

Knihovnu pohonů je možné uplatnit při návrhu robotických systémů. Uživatel knihovny pohonů si ušetří práci, kterou by strávil dohledáváním informací, popřípadě modelováním. Toto urychlení práce je ukázáno na příkladu tvorby manipulátoru s šesti stupni volnosti. Obzvlášť ve V-Repu je práce s vytvořenými modely velice rychlá.

Všech 45 modelů knihovny bylo uloženo do vytvořeného systému složek spolu s dokumentací výrobce.

Bakalářská práce prezentuje znalosti nabyté v rámci řešení projektu: „Digitální dvojčata robotických systémů a jejich verifikace II“, reg. č.: „SP2020/141“ financovaných ze státního rozpočtu České Republiky, na kterém jsem se v průběhu bakalářského studia podílel.

## Seznam použité literatury

- [1] *Ptc* [online]. Boston, Massachusetts, United States, 2020 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.ptc.com>
- [2] *A Quick History of PTC and PTC Creo*. Ptc [online]. Boston, Massachusetts, United States: PTC, c2020, 8. 14. 2014 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.ptc.com/en/cad-software-blog/a-quick-history-of-ptc-and-ptc-creo>
- [3] *A Brief History Of SolidWorks*. Scan2CAD [online]. Scan2CAD, c2020, 7. 12. 2017 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.scan2cad.com/cad/solidworks-history/>
- [4] *SolidWorks - 3D CAD navrhování*. SolidVision [online]. Brno: SolidVision [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: [www.solidvision.cz/solidworks/](http://www.solidvision.cz/solidworks/)
- [5] *Coppelia Robotics* [online]. Zürich, Switzerland: Coppelia Robotics [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: [www.coppeliarobotics.com](http://www.coppeliarobotics.com)
- [6] *Robotis* [online]. Lake Forest, CA, 2019 [cit. 2019-10-09]. Dostupné z: <http://www.robotis.us>
- [7] *Úvod do SolidWorks*. Dassault Systemes SolidWorks Corporation, 2018 [cit. 2020-05-15]. Dostupné: po instalaci SolidWorks
- [8] BOBOVSKÝ, Zdenko. *Výukové materiály V-Rep* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://lms.vsb.cz>
- [9] LIPINA, Jan a Marek STUDÉNKA. *CAD I: návody do cvičení* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012 [cit. 2020-05-15]. ISBN 978-80-248-2752-0.

## Přehled elektronických příloh práce

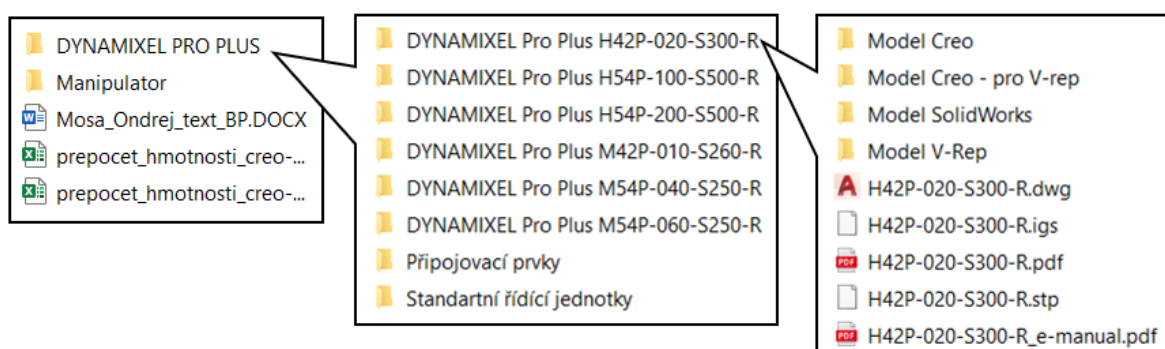
Příloha A: Bakalářská práce ve formátu DOCX

Příloha B: Knihovna pohonů Dynamixel PRO PLUS a jejich příslušenství (Obr. 52)

Příloha C: Manipulátor

Příloha D: Přepočet hmotností – pohony (formát XLSX)

Příloha E: Přepočet hmotností – přípojovací prvky (formát XLSX)



Obr. 52 Knihovna pohonů